

# PREDICCIÓN DE LOS CAMBIOS EN EL PERFIL DE PLAYA UTILIZANDO PARÁMETROS ADIMENSIONALES SENCILLOS

José A. Jiménez Quintana.

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

*Jefe del Área de Morfología Costera y CZM del LIM/UPC.*

Agustín Sánchez-Arcilla Conejo.

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

*Director del LIM/UPC.*

Herminia I. Valdemoro García.

Licenciada en Ciencias del Mar.

*Investigadora Junior.*

Laboratori d'Enginyeria Marítima. ETSICCPB. Universitat Politècnica de Catalunya.

## RESUMEN

*En este artículo se analiza el comportamiento de una serie de parámetros adimensionales para la predicción de los cambios en el perfil de playa debido al transporte transversal. El análisis se hace tanto desde el punto de vista cualitativo (aparición de erosión y/o acreción) como desde el punto de vista cuantitativo (magnitud de los cambios). Se ha utilizado un conjunto de datos obtenidos en diferentes experimentos a gran escala, por lo que las condiciones del test pueden considerarse próximas a las que nos podemos encontrar en la naturaleza. Se observa que para predecir el tipo de evolución del perfil no hace falta utilizar estimadores que incluyan la pendiente de la playa como variable, siendo en este caso los parámetros P (Dalrymple) y D (Dean) los que mejor porcentaje de acierto presentan. Sin embargo, si se quiere estimar un orden de magnitud de los cambios sufridos por el perfil hay que utilizar parámetros que incluyan la pendiente inicial del perfil (definida como la relación entre la profundidad de rotura y el ancho de la zona de rotura, siendo un indicativo del tamaño de la zona donde se disipa la energía del oleaje en el proceso de rotura). Por último se propone la utilización de un parámetro que combina la capacidad del parámetro de Dean para predecir el tipo de evolución del perfil y que incluye la pendiente como factor normalizador para estimar la magnitud de los cambios. Este estimador es el que mejor explica, para el conjunto de datos utilizados, los cambios de volumen observados.*

## ABSTRACT

*In this paper the performance of a set of dimensionless parameters used to predict beach profile changes due to cross-shore transport is analysed. The analysis has been done from the qualitative (presence of erosion and accretion) and quantitative (magnitude of the changes) standpoints. Several data sets obtained in large scale experiments have been used to make the test under conditions near the field ones. To predict the type of the change, parameters excluding the beach slope show the best performance, being the P (Dalrymple) and D (Dean) parameters the best ones. However, if the magnitude of the changes is required, parameters including the beach slope (defined as the ratio between breaking depth and surf zone width) as variable must be used. The use of a parameter which combines the ability of the Dean number to predict the type of change and which includes the beach slope to estimate the magnitude of the changes is proposed. This parameter is the best predictor of the observed beach profile changes for the used data set.*

Se admiten  
comentarios a este  
artículo, que deberán  
ser remitidos a la  
Redacción de la ROP  
antes del 30 de  
abril de 1997.

Recibido en ROP:  
septiembre de 1993

## 1. INTRODUCCIÓN

La acción del oleaje sobre un perfil de playa induce una serie de cambios, que en sentido transversal se resumen en: i) erosión de la parte interna del perfil y depósito del material erosionado en forma de barra sumergida, debido a la existencia de un transporte neto en dirección offshore, y ii) acreción y recuperación de la playa a partir del sedimento de la barra, debido a la existencia de un transporte neto onshore. Tradicionalmente, para la predicción de estos cambios se han utilizado una serie de parámetros adimensionales que incluyen la mayor parte de las variables implicadas en el proceso (oleaje, características del sedimento y características del perfil).

En este trabajo se analiza la capacidad predictiva de los parámetros más utilizados, a partir de un mismo conjunto de datos obtenido en diferentes experimentos a gran escala. El análisis se realiza tanto desde el punto de vista cualitativo (aparición de erosión/acreción) como cuantitativo (relación entre el valor del parámetro y las magnitudes de los cambios producidos).

El objetivo principal del análisis es encontrar que parámetros pueden predecir de forma cuantitativa los cambios que se producen en el perfil y, que variables hay que tener en cuenta para mejorar esta predicción. Especialmente, se analiza el papel que juega la pendiente del perfil ya que es una de las variables que genera más controversia en cuanto a la mejora de la capacidad predictiva de los parámetros.

Por último, se propone un estimador que al incluir la pendiente de la playa da una muy buena estima (en base a los datos utilizados) tanto del tipo de evolución del perfil como de la magnitud de los cambios.

## 2. DATOS UTILIZADOS

Los datos utilizados en este trabajo han sido obtenidos a partir de experimentos realizados en laboratorio a gran escala, por lo que se asegura que los cambios observados en el perfil eran debidos a la dinámica transversal a la vez que se minimizan los efectos de escala.

Se utilizaron datos obtenidos en tres experimentos independientes, cuyas especificaciones en cuanto a las instalaciones utilizadas pueden verse en las referencias respectivas: (CERC (U.S.A.): Kraus & Larson, 1988; CRIEPI (Japón): Kajima et al., 1982; GWK (Alemania): Dette & Uliczka, 1987). En total, los tres experimentos comprenden 35 ensayos, con un rango bastante amplio de condiciones experimentales que cubren las que podemos encontrar en la naturaleza para playas de arenas medias (ver tabla 1).

Los experimentos incluían ensayos de erosión y acreción, siendo su duración variable en función de la respuesta del perfil. En general, los ensayos se detenían cuando el perfil no experimentaba ninguna variación adicional aunque siguiera so-

metido a la acción del oleaje, es decir, cuando adoptaba una configuración de equilibrio ante el oleaje incidente. La duración máxima se situó en torno a las 100 horas (en varios casos del test CERC). En la figura 1 pueden verse algunos ejemplos típicos de los ensayos utilizados.

La totalidad de los ensayos fueron realizados bajo oleaje regular, excepto uno de los realizados en el experimento GWK, que fue realizado bajo condiciones de oleaje irregular. En la mayor parte de los casos, se suministraba la altura de ola en rotura medida durante la realización de los ensayos. Cuando no se disponía de este dato, se utilizó la expresión de Sunamura y Horikawa (1974) dada por la ecuación (1) para determinar su valor en rotura. Esta expresión fue analizada por Sunamura (1982) utilizando parte de los ensayos realizados en el test CRIEPI, observando que su comportamiento predictivo era razonablemente bueno.

$$\frac{H_b}{H_0} = m^{0.2} \left( \frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.25} \quad (1)$$

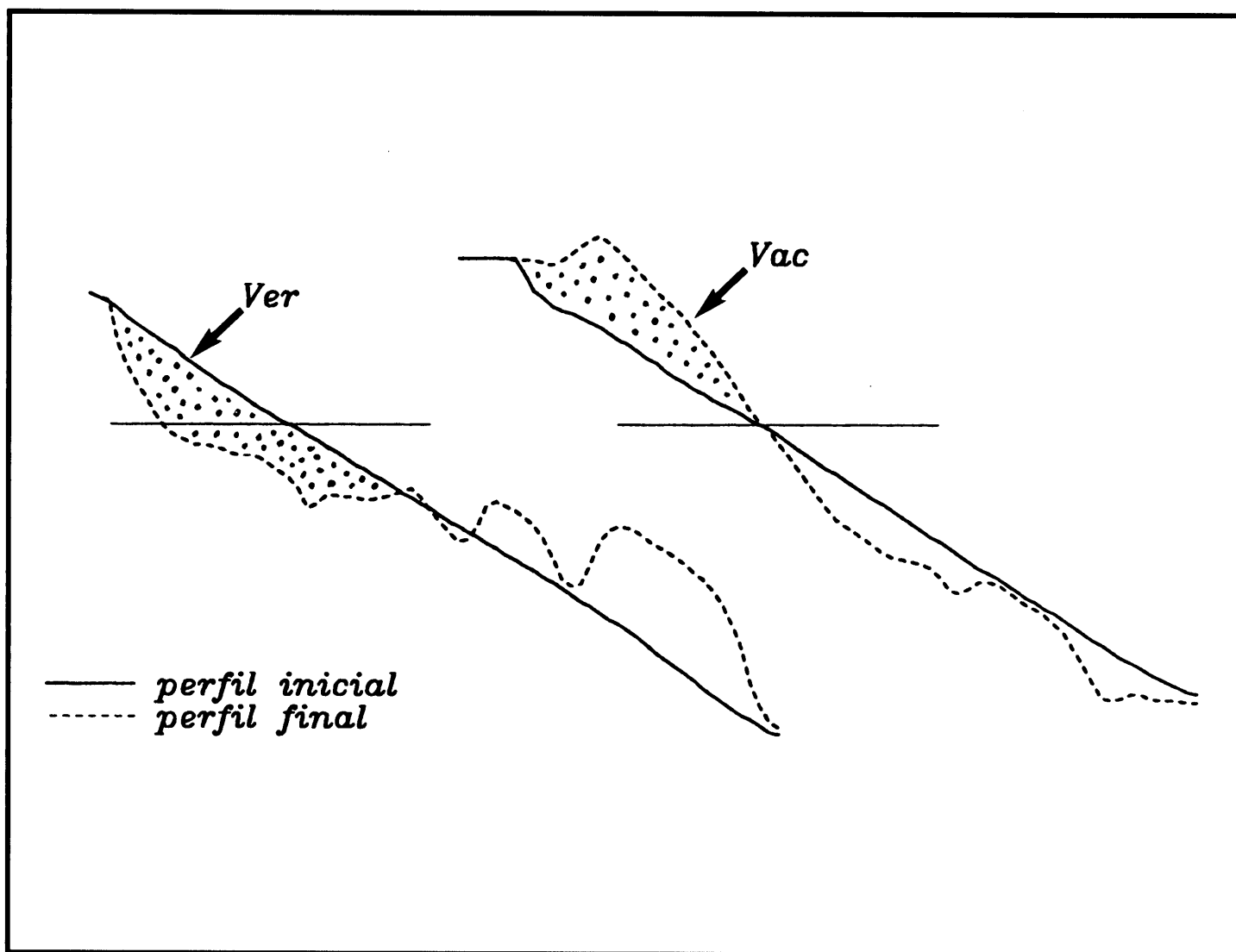
donde  $H_b$  es la altura de ola en rotura,  $H_0$  es la altura de ola en aguas profundas,  $L_0$  es la longitud de onda en aguas profundas y  $m$  es la pendiente del perfil.

Se evaluaron los volúmenes de erosión y acreción a partir de los perfiles iniciales y finales de cada ensayo (figura 1). Por tanto, los volúmenes obtenidos representan los volúmenes de equilibrio o, lo que es lo mismo, la respuesta máxima del perfil ante las condiciones del oleaje incidente.

## 3. ESTIMADORES

Los estimadores de acreción/erosión son la herramienta más sencilla de que se dispone para predecir el comportamiento evolutivo de un perfil de playa, dadas unas condiciones determinadas de oleaje. Existe un gran número de estimadores desarrollados a partir de diferentes puntos de partida (ver revisiones de Larson (1988) y Negro (1990) entre otros). En este trabajo se han dividido los estimadores en dos grupos: (i) aquellos que no incluyen la pendiente del perfil como variable y (ii) aquellos que sí la incluyen. Puesto que la mayor parte de los ensayos fueron realizados partiendo de perfiles iniciales planos, la identificación de la pendiente del perfil es sencilla. Sin embargo, de forma general, en este trabajo se define la pendiente de playa como la relación entre la profundidad de rotura y el ancho de la zona de rotura, siendo por tanto una medida de la zona donde las olas disipan su energía durante el proceso de rotura.

Cada uno de los parámetros, aunque originalmente presentados en forma de desigualdad o en forma gráfica, será reagrupado en forma compacta como números adimensionales.



**Figura 1. Cambios típicos de los perfiles durante los experimentos. Definición de los volúmenes de erosión y acreción.**

Esto implica que se asumen como correctas las relaciones funcionales originales, y sólo podrán ser reevaluados en cuanto al valor umbral que determina la presencia de erosión o acreción.

**TABLA 1. Rangos para las variables utilizadas en el conjunto de experimentos**

|                          |                                         |
|--------------------------|-----------------------------------------|
| Diámetro del sedimento:  | 220 $\mu\text{m}$ - 470 $\mu\text{m}$ . |
| Pendiente del perfil:    | 1/4 - 1/50.                             |
| Altura de ola ( $H_0$ ): | 0.30 m - 1.78 m.                        |
| ( $H_b$ ):               | 0.50 m - 2.40 m.                        |
| Periodo:                 | 3.1 s - 16 s.                           |
| Peralte:                 | 0.0011 - 0.100.                         |

## ESTIMADORES QUE NO INCLUYEN LA PENDIENTE

### Parámetro D

Este parámetro fue desarrollado por Dean (1973) a partir de un modelo heurístico de transporte transversal. Este mismo parámetro fue utilizado por Nayak (1970) al estudiar experimentalmente la reflexión del oleaje en playas de arena, obteniendo una relación entre este parámetro y la pendiente de la cara de la playa (en la zona próxima a la línea de orilla).

El modelo supone que el transporte offshore de sedimento se produce principalmente en suspensión. Se parte de la idea que las olas al romper ponen en suspensión las partículas de sedimento. Una vez puestas en suspensión, si el tiempo de caída de éstas es corto en relación al período del oleaje, el movimiento neto de las partículas será hacia la costa, mientras que si el tiempo relativo es grande, serán transportadas hacia el mar.

La expresión original del modelo viene dada por

$$\frac{H}{L_0} = C \frac{\pi w_f}{gT} \quad (2)$$

donde T es el período del oleaje,  $w_f$  es la velocidad de caída del sedimento, g la aceleración de la gravedad y C una constante empírica. En forma de número adimensional queda como

$$D = \frac{H}{w_f T} \quad (3)$$

El desarrollo original del modelo supone que la hidrodinámica de la zona de rotura mantiene una estructura oscilatoria aún habiendo roto ya el oleaje y que esta estructura oscilatoria es la que define el movimiento del sedimento. Aunque esto no es del todo correcto, el funcionamiento del parámetro es bueno ya que da una idea de la disponibilidad de las partículas a permanecer en suspensión. Cuanto mayor es la probabilidad de una partícula de estar en suspensión en la columna de agua, mayor es la probabilidad de que sea transportada aguas afuera por el flujo medio (undertow).

Kraus et al. (1991) hicieron una derivación heurística de este parámetro basada en el concepto de equilibrio. Derivaron el parámetro considerando por un lado, la disipación de energía por unidad de volumen en la zona de rompientes, y por otro lado, el trabajo necesario para mantener las partículas de sedimento en suspensión. Debido a la relación encontrada entre D y la disipación de energía, ellos concluyen que su valor debe estar relacionado con la magnitud del transporte.

#### Parámetro P

Este parámetro recientemente propuesto por Dalrymple (1992) es equivalente al propuesto con anterioridad por Larson y Kraus (1989). Fue obtenido a través de un reanálisis del parámetro de Dean utilizando datos de laboratorio a gran escala. A partir de este análisis se propuso una nueva relación funcional dada por la expresión

$$\frac{H}{L_0} = C \left( \frac{\pi w_f}{gT} \right)^{3/2} \quad (4)$$

que expresada en forma de parámetro adimensional queda como

$$P = \frac{gH^2}{w_f^3 T} \quad (5)$$

Puesto que este parámetro ha sido obtenido siguiendo las líneas originales de Dean, su interpretación física no debería variar en demasía, ya que sólo se ha reevaluado la relación funcional que rige su funcionamiento.

Con un poco de álgebra, este parámetro puede quedar expresado como el producto de dos números adimensionales, el parámetro de Dean, y otra velocidad de caída adimensional ( $gH/w_f^2$ ). Kraus et al. (1991) relacionan ambos parámetros con la disipación de energía del oleaje en rotura, postulando que las magnitudes de éstos están relacionadas con la magnitud del transporte.

### ESTIMADORES QUE INCLUYEN LA PENDIENTE

#### Parámetro SH

Este parámetro propuesto por Sunamura y Horikawa (1974) fue obtenido a partir de un análisis semi-empírico en base a la hidrodinámica de la zona de rompientes. En su forma original, este parámetro viene dado por la relación

$$\frac{H}{L_0} = C m^{-0.27} \left( \frac{d_{50}}{L_0} \right)^{0.67} \quad (6)$$

donde  $d_{50}$  es el diámetro medio de sedimento. En forma de número adimensional

$$SH = \frac{H}{L_0} m^{0.27} \left( \frac{L_0}{d_{50}} \right)^{0.67} \quad (7)$$

Posteriormente Sunamura (1980) llegó a una expresión igual a la ec. (6) a partir de un desarrollo en base a dos parámetros adimensionales: (i) un parámetro que describe el movimiento del sedimento, obtenido a partir del criterio de Komar y Miller (1973), y (ii) el número de Ursell como indicativo de la asimetría del campo de velocidades inducido por el oleaje. A partir de ambos parámetros establece el criterio de presentación de transporte onshore/offshore.

#### Parámetro HK

Este parámetro fue desarrollado por Hattori y Kawamata (1980) a partir de la evaluación de la relación entre las fuerzas movilizadoras debidas a la acción del oleaje que ponen el sedimento en suspensión, y las fuerzas restauradoras debidas al peso del sedimento. En su expresión original, el parámetro viene dado por

$$\frac{H}{L_0} m = C \frac{w_f}{gT} \quad (8)$$

que en forma de número adimensional queda como

$$HK = \frac{H}{w_f T} \quad (9)$$

Esencialmente, este parámetro es idéntico al obtenido por Dean, aunque incluyendo como variable adicional la pendiente de la playa y al igual que aquel, se asume que el transporte offshore se produce principalmente en suspensión. La ecuación (9) plantea la existencia de una relación lineal entre la pendiente de equilibrio de la playa y el parámetro de Dean.

#### Parámetro SG

Este parámetro propuesto por Sayao y Graham (1991) fue obtenido utilizando la técnica de análisis dimensional, siguiendo la aproximación de Sunamura (1984), con un posterior ajuste a datos de laboratorio de pequeña escala junto a datos de campo. El parámetro original viene dado por la relación

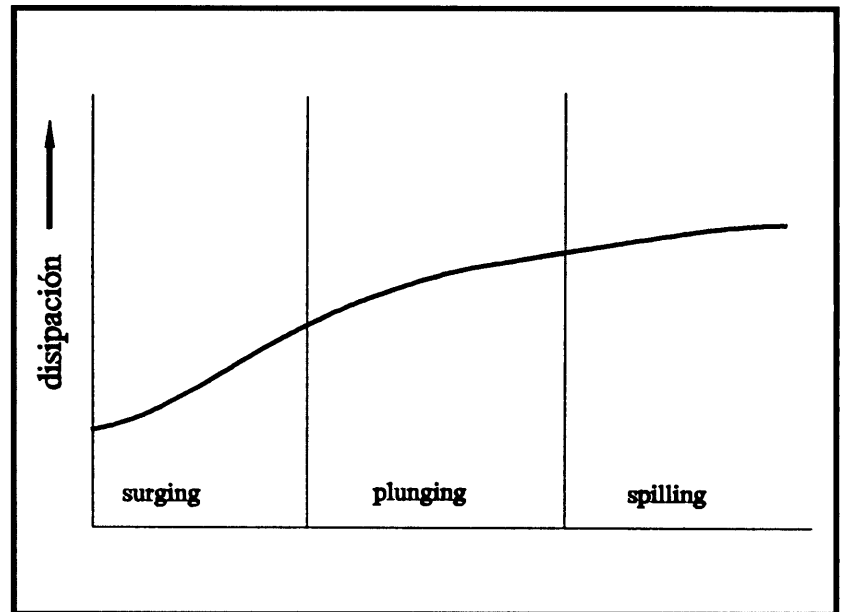
$$m = C \left( \frac{H}{d_{50}} \right)^{-1/4} \left( \frac{H}{L_0} \right)^{-1/4} \quad (10)$$

que en forma de número adimensional queda como

$$SG = m \frac{H^{0.5}}{(d_{50} L_0)^{0.25}} \quad (11)$$

El diámetro de sedimento adimensionalizado con la altura de ola ( $H/d_{50}$ ) es proporcional al parámetro de movilidad o de Shields (sin incluir el factor de fricción), el cual da la relación entre las fuerzas movilizadoras y restauradoras que actúan sobre el grano (e.g. Nielsen, 1992).

Aunque Kraus et al. (1991) explican el efecto del peralte del oleaje ( $H/L_0$ ), relacionándolo con la asimetría del oleaje, aquí será explicado desde otro punto de vista. El peralte, considerando la pendiente de la playa y la energía del oleaje incidente como constantes, controla el tipo de rotura del oleaje, la disipación y reflexión de energía, etc... (e.g. Battjes, 1974). Así, para peraltes grandes, el tipo de rotura predominante es en spilling, a medida que éste se reduce, la rotura es en plunging y para peraltes muy bajos, predomina la rotura en surging (fi-



**Figura 2. Tipo de rotura y disipación de energía en función del peralte (cualitativo).**

gura 2a). La variación del tipo de rotura lleva implícito una variación en la disipación de ésta en la zona de rotura (figura 2b), incrementándose desde roturas en surging, que es donde se produce una mayor reflexión de energía incidente hasta las roturas en spilling, que es cuando se disipa la mayor parte de la energía incidente. Por tanto, puede considerarse que hay una relación entre el peralte del oleaje y la disipación de energía en rotura, siendo ésta última mayor cuanto mayor sea el peralte del oleaje. Este aumento en la disipación de la energía a través de la zona de rompientes lleva consigo un aumento en la intensidad de la corriente de retorno (undertow), ya que a mayor disipación se produce un aumento en la tensión tangencial a nivel de seno (e.g. Stive y Wind, 1986), de la cual depende la magnitud del undertow (e.g. De Vriend y Stive, 1987). Por tanto, se puede concluir que un aumento en el peralte del oleaje incidente (sin aumentar la energía del oleaje) produce un aumento en la intensidad de la corriente de retorno.

#### Parámetro JS

Este parámetro utilizado para la predicción de erosión/acreción en perfiles de playa fue obtenido por Jiménez y Sánchez-Arcilla (1992) utilizando el análisis dimensional con un posterior ajuste a datos de laboratorio a gran escala y, viene dado por la relación

$$JS = \left( \frac{H}{w_f T} \right)^{0.5} m \quad (12)$$

El parámetro es similar al de Hattori y Kawamata, aunque en este caso la pendiente de equilibrio de la playa no sigue una relación lineal con el parámetro de Dean. Relaciones similares han sido obtenidas para la pendiente de la cara de la playa por Nayak (1970) y Dalrymple y Thompson (1976). Recientemente Kriebel et al. (1991) al reanalizar los datos presentados por Sunamura (1984) encontraron la misma relación funcional entre la pendiente de la cara de la playa y el parámetro de Dean.

#### 4. EVALUACIÓN CUALITATIVA DE LOS ESTIMADORES

En este apartado se evalúa la capacidad predictiva de los distintos estimadores propuestos en cuanto a su carácter cualitativo se refiere, es decir, la aparición de erosión o acreción en el perfil. Se ha realizado este análisis tanto para el caso de utilizar el parámetro evaluado en aguas profundas como en rompientes.

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos por cada uno de los parámetros con el conjunto de datos disponible. La fiabilidad en la predicción se representa como el porcentaje de los cambios observados que son bien delimitados por un valor umbral del parámetro.

En las figuras 3 y 4 puede verse gráficamente el comportamiento predictivo de los parámetros que mejor porcentaje de acierto presentan (P y D) evaluados en el punto donde mejor se comportan (rotura o aguas profundas). En la figura 5 puede

verse el comportamiento predictivo del parámetro que peor predice para el conjunto de datos utilizados (SG).

El resultado más destacable es que, de forma general, los parámetros que no incluyen la pendiente de la playa como variable (D y P) predicen la aparición de erosión o acreción mejor que aquellos que si la incluyen. Larson y Kraus (1989) al analizar el comportamiento predictivo de diversos estimadores, llegan a la conclusión que la incorporación de la pendiente inicial de la playa no mejora la capacidad predictiva de los parámetros, siempre y cuando la pendiente de la playa no se aleje excesivamente de la pendiente de equilibrio del perfil. Así, Kraus y Horikawa (1990) postulan que cuando la pendiente inicial se aleja mucho de la condición de equilibrio, los estimadores que no incluyen como variable la pendiente inicial comienzan a dejar de ser válidos.

Por lo tanto, a partir del análisis realizado, puede concluirse que la predicción de la aparición de erosión o acreción puede hacerse teniendo en cuenta solamente los agentes responsables de dichos procesos (agentes movilizadores, vía características del oleaje, y agentes restauradores vía características del sedimento). Esta independencia de la pendiente inicial de la playa será válida cuando nos encontremos con pendientes naturales, comenzando a perder capacidad predictiva cuanto más se aleje la pendiente de la condición de equilibrio.

#### 5. EVALUACIÓN CUANTITATIVA DE LOS ESTIMADORES

En este apartado se evalúa la capacidad de los estimadores para dar un orden de magnitud de los cambios que se producen en el perfil. En primera aproximación, se ha supuesto que existe una relación lineal entre el valor del parámetro y los cambios de volumen. El comportamiento predictivo se evalúa en base a un análisis de regresión donde el valor del coeficiente de determinación,  $r^2$ , (por definición, el coeficiente de determinación es el cuadrado del coeficiente de correlación de la muestra) indica su bondad. En la tabla 3 se presentan los coeficientes obtenidos.

El valor de  $r^2$ , se interpreta como la proporción de la variación observada de una variable, que puede ser explicada por el modelo de regresión (e.g. Devore, 1987). Cuanto mayor es este coeficiente, mejor es el modelo para explicar la variación de la variable. Por definición, el coeficiente de determinación es el cuadrado del coeficiente de correlación de la muestra.

En primer lugar se considerarán aquellos parámetros que presentaron el mejor acierto en la predicción cualitativa. Puede observarse que tanto el parámetro de Dean como el parámetro de Dalrymple muestran para un mismo valor del parámetro diferentes cambios de volumen (figuras 3 y 4). Sin embargo, si se agrupan los casos en función de la pendiente inicial del perfil, se observa la existencia de una tendencia definida en los datos (figura 6). A medida que aumenta el valor del parámetro,

**TABLA 2. Evaluación cualitativa de los estimadores.**  
(ACIERTO: porcentaje de casos de erosión/acreción bien predichos, (x) número de casos erróneos;  
UMBRALES: valor umbral que delimita los casos de erosión/acreción)

| ESTIMADOR | TIPO      | ACIERTO   | UMBRALES |
|-----------|-----------|-----------|----------|
| D         | ag. prof. | 91,4% (3) | 2,7      |
|           | rotura    | 97,1% (1) | 4,0      |
| P         | ag. prof. | 100 % (0) | 9,500    |
|           | rotura    | 94,3% (2) | 24,200   |
| SH        | ag. prof. | 94,3% (2) | 20       |
|           | rotura    | 91,4% (3) | 30       |
| HK        | ag. prof. | 94,3% (2) | 0,12     |
|           | rotura    | 88,6% (4) | 0,20     |
| SG        | ag. prof. | 82,8% (6) | 0,10     |
|           | rotura    | 77,1% (8) | 0,14     |
| JS        | ag. prof. | 85,7% (5) | 0,09     |
|           | rotura    | 85,7% (5) | 0,11     |

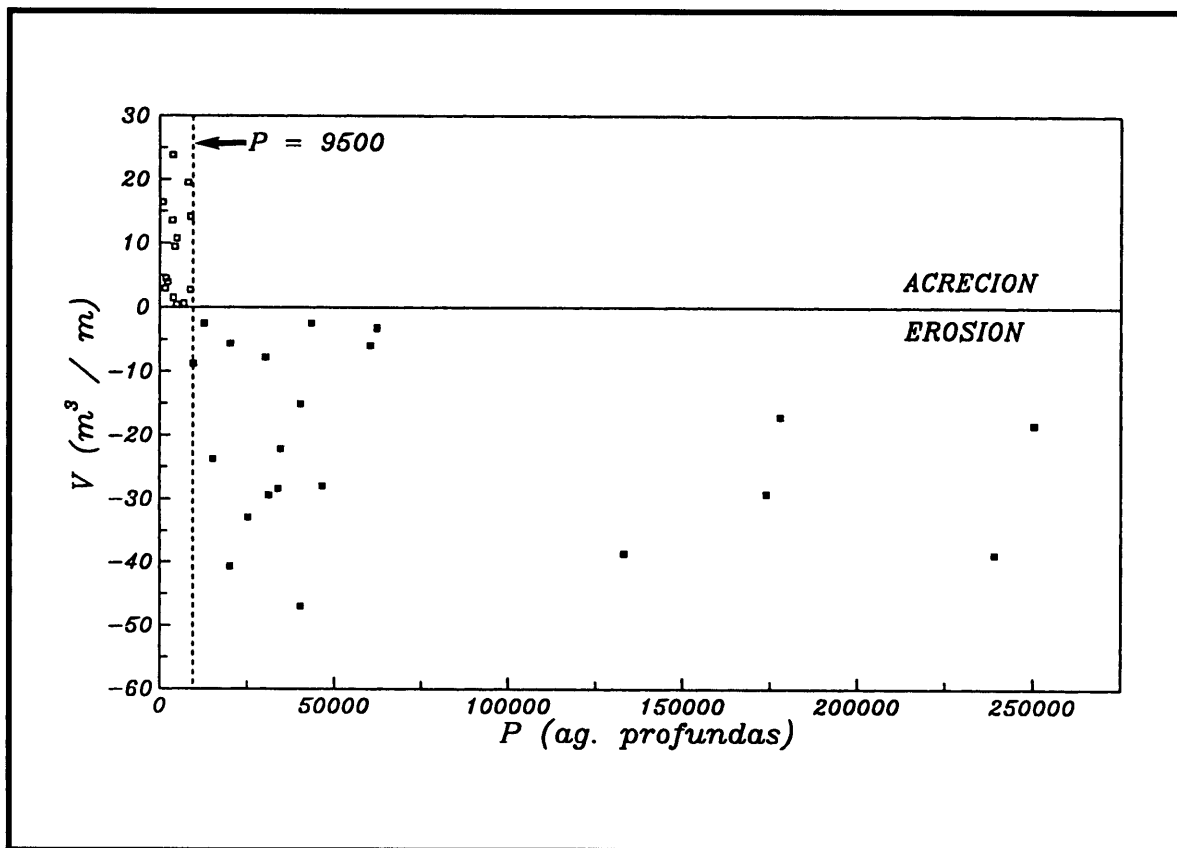


Figura 3.  
Volúmenes  
de erosión y  
acreción versus  
 $P_{\sigma}$

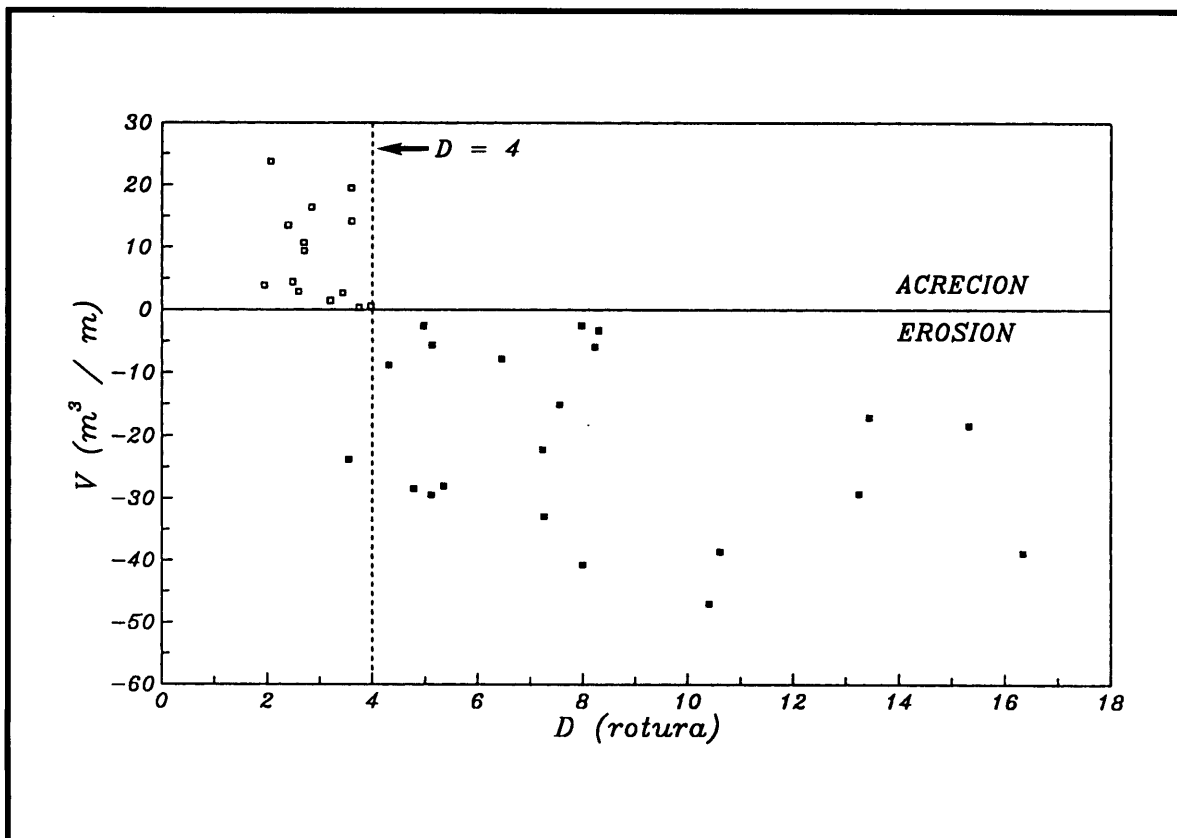


Figura 4.  
Volúmenes de  
erosión y  
acreción  
versus  $D_b$

**TABLA 3. Evaluación cuantitativa de los estimadores.**  
 Coeficientes de determinación mediante análisis de correlación ((1): sin considerar el caso C700; (2): considerando el caso C700; J (\*): parámetro propuesto).

| ESTIMADOR | TIPO      | $r^2$ (1) | $r^2$ (2) |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| D         | ag. prof. | 0.43      | 0.38      |
|           | rotura    | 0.49      | 0.44      |
| P         | ag. prof. | 0.38      | 0.35      |
|           | rotura    | 0.43      | 0.41      |
| SH        | ag. prof. | 0.62      | 0.57      |
|           | rotura    | 0.63      | 0.61      |
| HK        | ag. prof. | 0.61      | 0.56      |
|           | rotura    | 0.63      | 0.59      |
| SG        | ag. prof. | 0.58      | 0.55      |
|           | rotura    | 0.51      | 0.50      |
| JS        | ag. prof. | 0.63      | 0.59      |
|           | rotura    | 0.57      | 0.55      |
| J (*)     | ag. prof. | 0.76      | 0.70      |
|           | rotura    | 0.81      | 0.72      |

aumenta el valor del volumen de erosión. Además, el volumen de erosión aumenta cuanto mayor es la pendiente inicial.

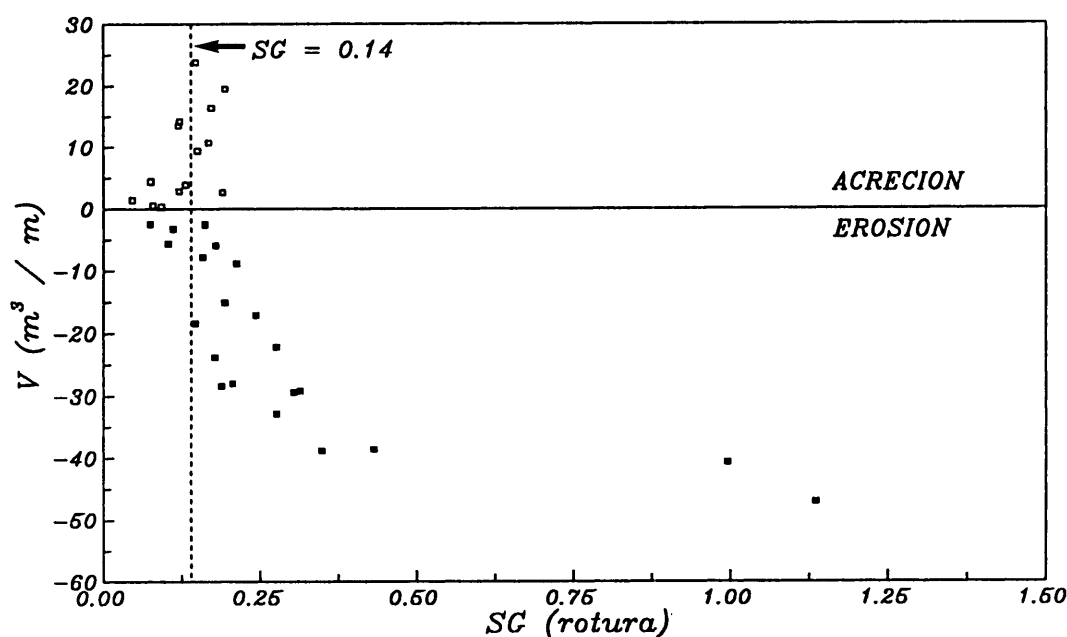
Es decir, sí que existe una relación intrínseca entre el valor de los parámetros y los incrementos de volumen (tanto para D como para P) como postulaban Kraus et al. (1991), pero sólo para perfiles con unas características iniciales similares (pendiente). Por tanto, si no se consideran estas condiciones iniciales en el perfil, la utilización de estos parámetros para evaluar la magnitud de los cambios puede inducir a error. Por ejemplo, para un valor de P (ag. profundas) de 20,000 se verifica un volumen de erosión de 5.6 m<sup>3</sup>/m para un perfil inicial con una pendiente de 3/100, mientras que en otro ensayo con un perfil de pendiente inicial de 1/4 y con el mismo valor de P, se producía un volumen de erosión de 40.7 m<sup>3</sup>/m.

Esta no inclusión de la pendiente hace que estos dos parámetros (D y P) sean con diferencia, los que presentan una peor predicción de la magnitud de los cambios (tabla 3).

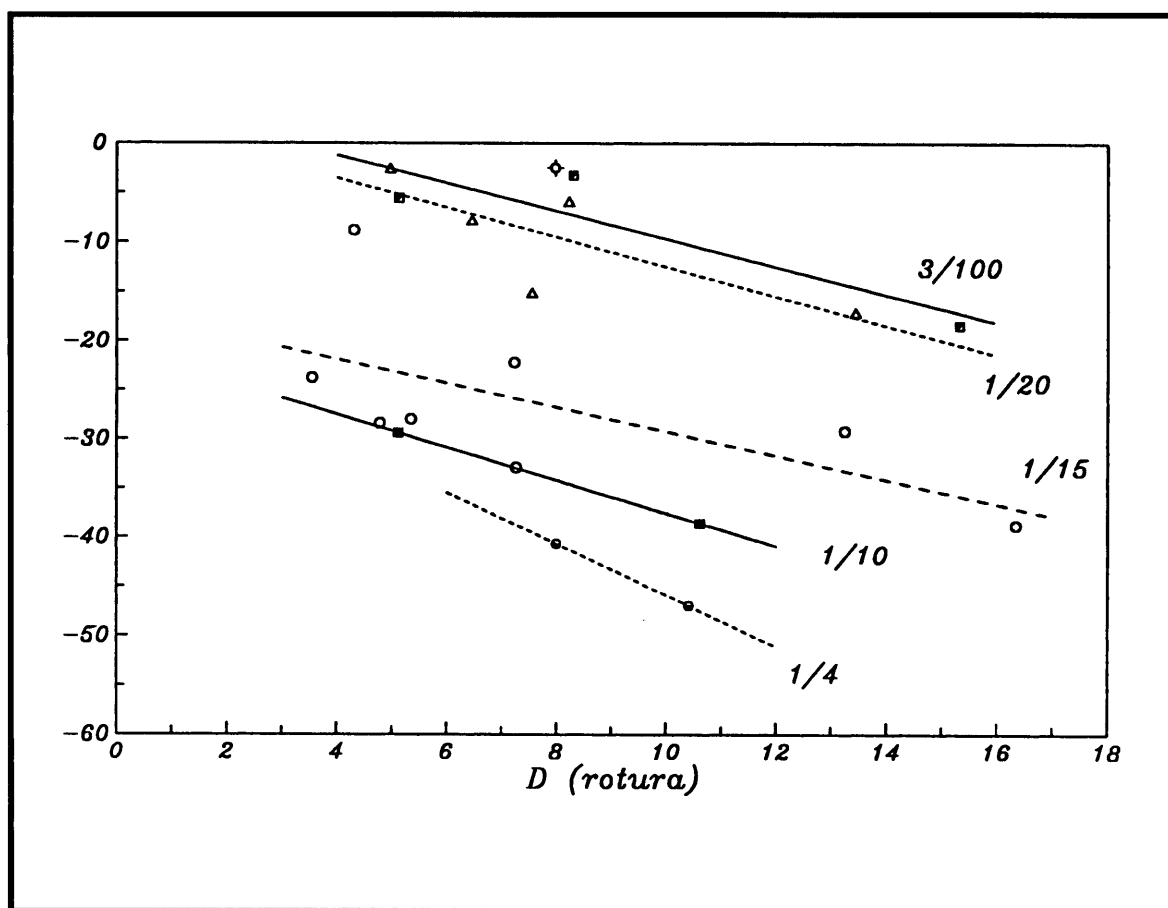
En cambio, cuando se consideran los parámetros que incluyen la pendiente, el coeficiente de determinación aumenta de forma generalizada, con lo que se produce una mejora en la explicación de los cambios. Es decir, la inclusión de la pendiente supone una normalización de todos los casos, y por lo tanto, la variación en la magnitud de los cambios que sufre el perfil si que está relacionada directamente con la variación del

parámetro. En la figura 5 pueden verse los cambios de volumen frente a los valores respectivos de SG. Aunque persiste una cierta dispersión, los casos están normalizados, pudiéndose identificar una tendencia definida.

Como conclusión, la utilización de estimadores que incluyen la pendiente permite una valoración de la magnitud de los cambios que se producen en el perfil, ya que ésta, al determinar las dimensiones de la zo-



**Figura 5.**  
 Volúmenes de erosión y acreción versus SG<sub>p</sub>.



**Figura 6.**  
Volúmenes de erosión versus  $D_b$  agrupados por pendientes iniciales.

metro de Dean respecto del valor de equilibrio. La pendiente de la playa actúa como factor normalizador para determinar las dimensiones de la zona de disipación.

En la tabla 3 puede verse que el coeficiente de determinación de este parámetro es el mayor de todos. En la figura 7 se presenta gráficamente la relación entre el valor del parámetro y los cambios de volumen observados.

na donde se disipará la energía del oleaje, actúa como factor normalizador de los perfiles en cuanto a sus características iniciales.

Sin embargo, ya se ha puesto de manifiesto que estos parámetros eran peores predictores desde el punto de vista cualitativo, sobre todo en los casos donde los valores del parámetro están cerca de la zona de equilibrio, es decir, para cambios de pequeña magnitud. Para resolver este problema, se propone la utilización de un parámetro que permita tener ambas capacidades predictivas, cualitativa y cuantitativa.

El parámetro propuesto está basado en los estimadores  $D$  y  $JS$ , y viene dado por la relación (Jiménez et al., 1993)

$$JA = |D_{b,eq} - D_b|^{0.5} m \quad (13)$$

donde  $D_b$  es el parámetro de Dean evaluado en rotura y  $D_{b,eq}$  es el valor umbral de dicho parámetro ( $D_{b,eq} = 4$ ). El estado del perfil (erosión o acreción) viene dado por el signo de ( $D_{b,eq} - D_b$ ). Valores positivos indican acreción mientras que los valores negativos indican erosión. Asumiendo que la derivación de Kraus et al. (1991) es correcta, este estimador da la magnitud del transporte en función de la desviación del valor del pará-

la aplicabilidad de la expresión propuesta, se utilizó un conjunto de datos obtenido en un experimento a gran escala (LIP-11D experiment) recientemente realizado en el Delft Hydraulics Laboratory (Sánchez-Arcilla et al. 1994). Estos datos fueron obtenidos con oleaje irregular y con un perfil inicial próximo al equilibrio. Estas condiciones son próximas a las que nos podemos encontrar en la naturaleza y por lo tanto puede considerarse como un test de la validez del predictor bajo condiciones reales (con incidencia normal del oleaje).

En la figura 7 puede verse la inclusión de los nuevos casos (3 erosivos y 1 acumulativo). Los cambios de volumen experimentados por cada ensayo, están dentro de un margen más que aceptable de los predichos por el estimador propuesto. Puesto que los ensayos se han hecho con oleaje irregular, hay que definir la altura de ola característica. En este caso, la altura de ola que mejor se adecúa a los datos es la altura de ola media. Este hecho fué también comprobado por Kraus et al. (1991) analizando cambios en el perfil con datos de campo, definiendo la altura de ola media como "la piedra de roseta" para la aplicación de los estimadores en reales y con oleaje irregular.

Si en cambio se usa un estimador que no incluya la pendiente de la playa, como por ejemplo el parámetro  $P$ , el cual fué propuesto como indicador de la magnitud de los cambios

**Figura 7.**  
**Volúmenes de**  
**erosión y**  
**acreción versus**  
 **$JA_b$**

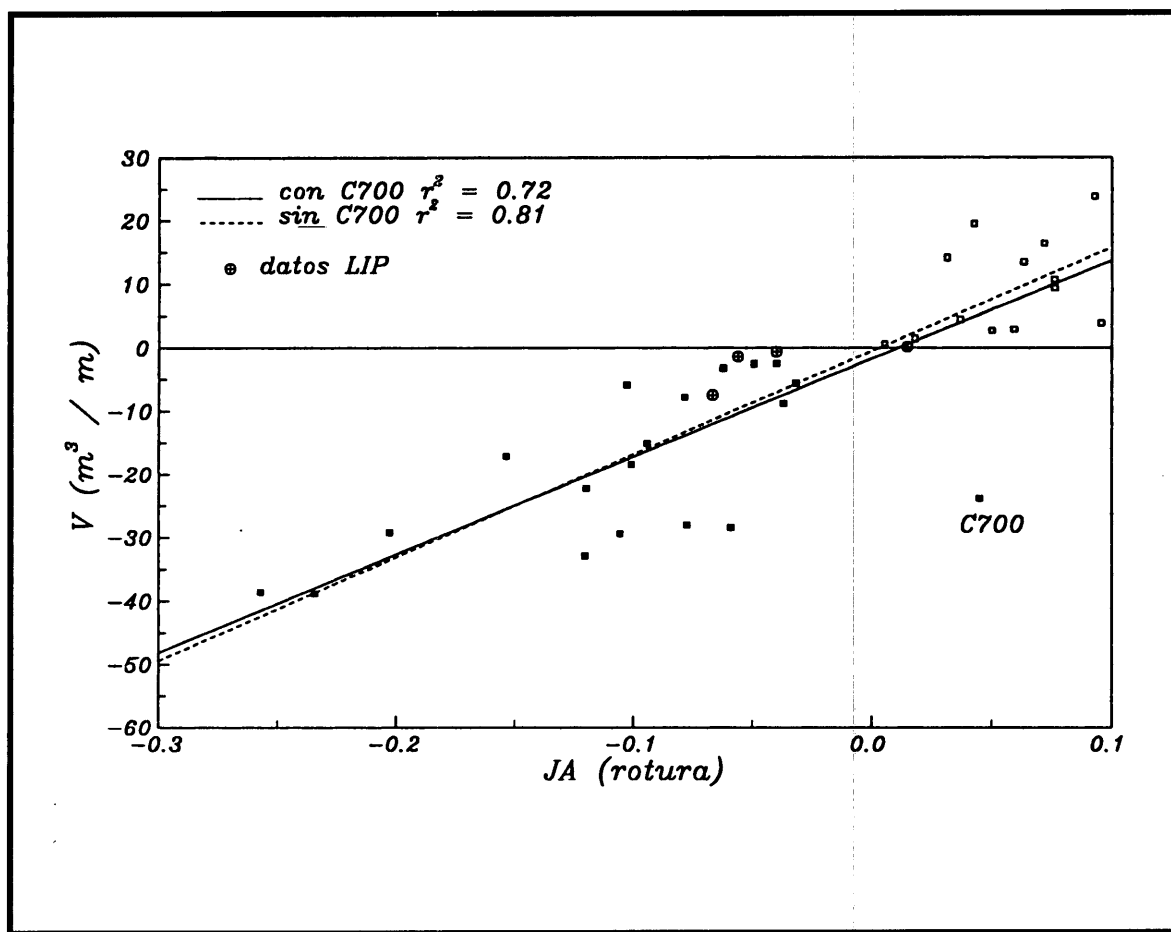
tanto por Kraus et al. (1991) y Dalrymple (1992), se observa que el comportamiento predicho es bastante diferente al real. Así, en los casos erosivos, se produjeron cambios de volumen de  $-0.65 \text{ m}^3/\text{m}$ ,  $-1.4 \text{ m}^3/\text{m}$  y  $-7.47 \text{ m}^3/\text{m}$ . Para estos casos, el parámetro P presentaba unos valores de 185.000, 391.000 y 427.000 respectivamente. Estos valores sobrepasan de forma importante los que se proponen para la situación de equilibrio (10.400) y corresponderían a casos altamente erosivos, mientras que, en realidad, la erosión sufrida por los perfiles fué muy pequeña. En el caso acumulativo, la acreción experimentada por el perfil fué muy pequeña ( $0.144 \text{ m}^3/\text{m}$ ) y no visible en la parte emergida del perfil. Sin embargo, al calcular el valor de P asociado a este experimento, se obtiene un valor de 34000 que predice la erosión del perfil, cosa que no ocurre.

## 6. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Se ha analizado el comportamiento predictivo de una serie de estimadores de acreción/erosión, a partir de datos obtenidos en experimentos a gran escala. El análisis se ha hecho tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo.

Desde el punto de vista cualitativo (aparición de erosión/acreción) los estimadores que no incluyen la pendiente de la playa son los que mejor comportamiento presentan, siendo su porcentaje de acierto muy alto. Asimismo, se ha reevaluado el valor umbral de los estimadores en función del conjunto de datos utilizados.

Para el análisis cuantitativo, se ha realizado un análisis de regresión lineal entre los valores de cada uno de los paráme-



tros y los cambios de volumen observados. El valor del coeficiente de determinación se utiliza como índice de la bondad de la capacidad predictiva del parámetro. Se observa que, de forma general, los predictores que incluyen la pendiente inicial del perfil como variable, presentan los mayores coeficientes de determinación, y por lo tanto, los que explican mejor los cambios del perfil.

Se propone un estimador que utiliza la capacidad predictiva del parámetro de Dean para definir el tipo de cambio que sufre el perfil, y que incluye la pendiente para caracterizar las dimensiones de la zona donde se disipará la energía del oleaje. Este parámetro es el que presenta el valor más alto del coeficiente de determinación de todos los estimadores analizados y por lo tanto, es el que mejor predice la magnitud de los cambios.

Por último se ha analizado el comportamiento de este parámetro con un conjunto de datos adicional, obtenido en condiciones próximas a las reales (oleaje irregular y perfil tipo equilibrio). El parámetro muestra una predicción razonablemente buena, utilizando la altura de ola media como altura característica del oleaje irregular.

Como conclusión final, el tipo de evolución del perfil (acreción/erosión) puede ser predicho en base a estimadores que no incluyan la pendiente, a no ser que ésta se aparte en dema-

sía del estado de equilibrio, pero para estimar el orden de magnitud de los cambios hay que incluir la pendiente del perfil como variable.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido parcialmente financiado por el MOPT a través del Programa de Clima Marítimo dentro del convenio Procesos hidrodinámicos en la zona de rompientes, a quienes se agradece el apoyo prestado. La participación de Herminia I. Valdemoro ha sido posible gracias a una beca de formación de personal investigador otorgada por el Comissionat per a Universitats i Recerca (Departament de Presidencia) de la Generalitat de Catalunya.

## REFERENCIAS

- Battjes, J.A.** (1974). «Surf similarity». Proc. 14th Coastal Eng. Conf., ASCE, 466-480.
- Dalrymple, R.A.** (1992). «Prediction of storm/normal beach profiles». Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, 118, 2, 193-200.
- Dalrymple, R.A. y Thompson, W.** (1976). «Study of equilibrium beach profiles». Proc. 15th Coastal Eng. Conf., ASCE, 1277-1296.
- Dean, R.G.** (1973). «Heuristic models of sand transport in the surf zone». Proc. of the Conf. on Engineering Dynamics in the surf zone, 208-214.
- Devore, J.L.** (1987). Probability and Statistics for Engineering and the Sciences. Brooks/Cole Publishing Company, Monterey, California, 572 pp.
- De Vriend, H.J. y Stive, M.J.F.** (1987). «Quasi-3D modelling of nearshore currents». Coastal Engineering, 11, 565-601.
- Dette, H.H. y Uliczka, K.** (1987). «Prototype investigation on time-dependent dune recession and beach erosion». Coastal Sediments' 87, ASCE, 1430-1444.
- Hattori, M. y Kawamata, R.** (1980). «Onshore-offshore transport and beach profile change». Proc. 17th Coastal Eng. Conf., ASCE, 1175-1193.
- Jiménez, J.A. y Sánchez-Arcilla, A.** (1992). «Simulación de cambios a corto plazo en la línea de costa». Revista de Obras Públicas, 3315, 41-51.
- Jiménez, J.A.; Sánchez-Arcilla, A. y Stive, M.J.F.** (1993). «Discussion on prediction of storm/normal beach profiles». Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, 119, 4, 466-468.
- Kajima, R.; Shimizu, T.; Maruyama, K. y Saito, S.** (1982). «Experiments of beach profile change with a large wave flume». Proc. 18th Coastal Eng. Conf., ASCE, 1385-1404.
- Komar, P.D. y Miller, M.C.** (1973). «The threshold of sediment movement under oscillatory water waves». Journal of Sedimentary Petrology, 43, 1101-1110.
- Kraus, N.C. y Horikawa, H.** (1990). «Nearshore sediment transport». En: LeMehaute, B. y Hanes, D. (eds.) Ocean Engineering Science, The Sea (Vol. 10), Wiley-Interscience, New York, 775-813.
- Kraus, N.C. y Larson, M.** (1988). «Beach profile change measured in the tank for large waves 1956-1957 and 1962». Technical Report CERC-88-6. US Army Corps of Engineers.
- Kraus, N.C.; Larson, M. y Kriebel, D.L.** (1991). «Evaluation of beach erosion and accretion predictors». Coastal Sediments' 91, ASCE, 572-587.
- Kriebel, D.L.; Kraus, N.C. y Larson, M.** (1991). «Engineering methods for predicting beach profile response». Coastal Sediments' 91, ASCE, 557-571.
- Larson, M.** (1988). «Quantification of beach profile change». Report 1008. Dept. of Water Resources Engineering, Lund University, Institute of Science and Technology.
- Larson, M. y Kraus, N.C.** (1989). «SBEACH: numerical model for simulating storm-induced beach change». Technical Report CERC-89-9. US Army Corps of Engineers.
- Nayak, I.V.** (1970). «Equilibrium profiles of model beaches». Proc. 12th Coastal Eng. Conf., ASCE, 1321-1340.
- Negro, V.** (1990). «La variabilidad de los perfiles de playa. Perfiles de verano e invierno. Análisis histórico (1ª parte)». Revista de Obras Públicas, Marzo 1990, 23-29.
- Nielsen, P.** (1992). Coastal bottom boundary layers and sediment transport. Advances Series on Ocean Engineering, World Scientific, Singapore, 324p.
- Sánchez-Aracilla, A.; O'Connor, B.; Roelvink, J.A. y Jiménez, J.A.** (1994). «The Delta Flume '93 experiment». Proc. Coastal Dynamics' 94, ASCE (en preparación).
- Sayao, O.J. y Graham, J.E.** (1991). «On the prediction of beach profiles». Associate Committee on Shorelines, 5, 1, 14-23.
- Stive, M.J.F. y Wind, H.G.** (1986). «Cross-shore mean flow in the surf-zone». Coastal Engineering, 10, 325-340.
- Sunamura, T.** (1980). «A laboratory study of offshore transport of sediment and a model for eroding beaches». Proc. 17th Coastal Eng. Conf., ASCE, 1051-1070.
- Sunamura, T.** (1982). «Determination of breaker height and depth in the field». Ann. Rep., Inst. Geosciences, Univ. of Tsukuba, 8, 53-54.
- Sunamura, T.** (1984). «Quantitative predictions of beach-face slopes». Geological Society America Bulletin, 95, 242-245.
- Sunamura, T. y Horikawa, K.** (1974). «Two-dimensional beach transformation due to waves». Proc. 14th Coastal Eng. Conf., ASCE, 920-938.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS.** (1984). Shore Protection Manual, Coastal Engineering Research Center, Washington DC. ●