

# La predicción de la respuesta temporal del perfil de playa como elemento fundamental en la gestión costera.

Isacc Azuz Adeath\*

## Resumen

*Tener estimaciones acertadas de la respuesta temporal que experimentan los perfiles de playa es un requisito indispensable para una gran variedad de propósitos predictivos, preventivos, reconstructivos, regulatorios o de gestión costera. Diferentes metodologías han sido propuestas para predecir la erosión que experimentan las playas y las dunas. En este trabajo, se presenta una forma de aplicar el "Método de Convolución" para la respuesta temporal de los perfiles de playa, en la construcción de mapas predictivos del retroceso máximo que puede experimentar una playa ante diferentes condiciones asociadas a las mareas meteorológicas ("Storm Surge"). El objetivo principal de este estudio es proponer una herramienta de fácil manejo para prevenir los posibles daños asociados a la erosión del perfil de playa como consecuencia de la presencia de mareas meteorológicas.*

## Abstract

*Accurate estimates of time-dependent beach profile erosion are required for a great variety of predictive, reconstructive, regulatory or managerial purposes. Different methodologies to predict beach and dune erosion have been proposed. In this study, the "Convolution Method" for time-dependent beach-profile response is applied in order to construct predictive maps for the maximum profile retreat that the beaches can attain under different storm-surge conditions. The main purpose of this work is to propose a user-friendly tool for the prevention of damage caused by the erosion of the shoreline associated with storm-surges.*

## Introducción

La zona costera es una región dinámica, donde concurren e interactúan de manera compleja un gran número de variables y procesos ambientales (e.g. químicos, físicos, geológicos, biológicos, ecológicos) en combinación con diferentes actuaciones y presiones de carácter antropogénico (e.g. aumento poblacional, contaminación, extracción de recursos, usos comerciales y recreacionales crecientes, etc.).

Si las playas son consideradas como un recurso natural de alto valor medioambiental, generadoras de riqueza y bienestar social, es necesario tomar en cuenta la variabilidad permanente que ellas presentan.

Los forzamientos que generan los cambios costeros tienen diferentes escalas temporales y espaciales de actuación. Existen modificaciones de largo plazo (cientos de años) asociadas a la subsidencia de la zona costera o al aumento que experimenta el nivel del mar debido al cambio climático global.

En escalas temporales del orden de décadas, la línea de costa puede experimentar modificaciones asociadas a variaciones en la capacidad del transporte litoral en respuesta a la implantación de obras de protección o abrigo creadas por el hombre, o bien, por deficiencias (e.g. construcción de presas) o excesos (e.g. lluvias en zonas deforestadas) de material sedimentario.

La morfología costera también responde ante las variaciones anuales que presenta la

\* Centro de Enseñanza Técnica y Superior, CETYS-Universidad.

energía del oleaje y a fenómenos episódicos de gran impacto, con escalas de actuación del orden de días (e.g. huracanes, depresiones tropicales, mareas meteorológicas, etc.).

Eventos episódicos de mayor duración (e.g. fenómeno del Niño) también producen alteraciones sustanciales en las costas (e.g. Storlazzi y Griggs, 1998; Griggs y Brown, 1998; Komar, 1998).

En escalas temporales menores, la configuración de las playas incluso puede verse modificada en un ciclo mareal o en periodos tan cortos como el paso de una ola.

El impacto geomorfológico, ecológico, social y económico que producen estos cambios en la configuración costera necesita ser evaluado adecuadamente para poder gestionar y regular las actividades que se desarrollan en dicha zona.

En la mayor parte de las costas mexicanas, son conocidos los efectos devastadores del paso de sistemas tropicales, los cuales, en mayor o menor medida inciden año con año, ocasionando graves pérdidas económicas (directas e indirectas), teniendo incluso consecuencias fatales.

La alta variabilidad costera evidencia la necesidad de contar con herramientas técnicas que permitan predecir la respuesta de las playas ante estos fenómenos con el fin de tomar medidas de prevención, protección, restauración o gestión de la zona litoral.

Actualmente, el conocimiento de los procesos fundamentales que tienen lugar en las playas durante el paso de las tormentas es limitado (Holman y Sallenger, 1986). Adicionalmente a esta deficiencia de conocimientos, el aumento del nivel de mar asociado al cambio climático global y sus efectos colaterales como el incremento en la incidencia de tormentas y huracanes causado en parte por el calentamiento de la superficie oceánica (Rusell, 1993) hace que los métodos para predecir la respuesta que experimentan los perfiles de playa ante la erosión inducida por tormentas, sean más necesarios.

Existen diferentes modelos encaminados a simular la evolución de la morfodinámica costera o de algún rasgo particular de la misma (e.g. perfil de playa, línea de orilla, evolución del fondo), una revisión sobre el particular en castellano se puede encontrar en Azuz (1997).

Los primeros intentos para predecir la erosión de las playas y dunas adyacentes fueron hechos por Edelman (1968, 1972), y desde entonces han sido propuestas diferentes aproximaciones a este problema: métodos esquemáticos, relaciones semi-empíricas basadas en datos experimentales tanto de laboratorio como de campo, modelos numéricos y métodos analíticos también llamados "ingenieriles", los cuales se enfocan fundamentalmente a la solución práctica de problemas concretos, sin intentar conocer y explicar en su totalidad la física subyacente a los distintos fenómenos.

De los métodos de predicción esquemáticos, entre los cuales se puede considerar el trabajo de Bruun (1962), Edelman (1968, 1972), Swart (1974) y Dean (1976), ninguno ha sido verificado totalmente, ni ha resultado completamente adecuado para estimar de manera práctica la erosión asociada al paso de tormentas (Kriebel y Dean, 1985).

Los estudios experimentales (e.g. Vellinga, 1982, 1983; van de Graaff, 1983) han aumentado considerablemente la capacidad de reproducir la erosión de las dunas en condiciones de laboratorio y coinciden razonablemente bien con algunos casos registrados en el campo bajo condiciones específicas.

La mayoría de los modelos numéricos que se usan para simular la evolución del perfil de playa emplean alguna versión simplificada de la ecuación de conservación de la masa sedimentaria, usualmente asumiendo la uniformidad del transporte a lo largo de la costa (e.g. Dally y Dean, 1984; Kriebel y Dean, 1985; Wen-Juinn y Ching-Ton, 1991; Nairn y Southgate, 1993).

En su forma general, dicha ecuación relaciona la razón de cambio de la elevación del fon-

do ( $Z_b$ ) o del calado ( $h$ ) con la variación espacial de la tasa de transporte sedimentario  $q(q_x, q_y)$  y puede ser escrita como:

(Ec. 1)

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} = -\nabla \cdot \bar{q}$$

Desgraciadamente, hasta el día de hoy no existe ninguna fórmula universalmente aceptada que calcule de manera satisfactoria el movimiento sedimentario asociado al paso de tormentas, es decir, predominantemente en la dirección normal a la costa ( $q_x$ ).

Los métodos analíticos o ingenieriles para predecir los cambios en los perfiles de playa se basan en los conceptos del "perfil de equilibrio" (e.g. Kriebel y Dean, 1985; Kobayashi, 1987; Kriebel et al., 1991; Kriebel y Dean, 1993).

Diferentes formas del perfil de equilibrio, bastante cercanas a las condiciones naturales pueden ser propuestas y empleadas con el fin de obtener soluciones analíticas para determinar la máxima erosión potencial del perfil en respuesta a variaciones estacionarias en el nivel del mar.

Este tipo de modelos emplea parámetros que pueden ser fácilmente medidos/calibrados en el campo (e.g. geometría del perfil, tamaño sedimentario, características de la rompiente), sus bases físicas se apoyan en extensas evidencias experimentales y naturales, y no involucran de manera explícita ninguna fórmula para calcular el transporte sedimentario.

Los métodos analíticos han funcionado de manera razonable en pruebas de campo (Kriebel y Dean, 1993), tienen una exactitud adecuada desde el punto de vista de la ingeniería de costas y pueden ser interpretados con relativa facilidad por los gestores de la zona costera.

Este artículo presenta una aplicación del "Método de Convolución" para la respuesta temporal del perfil de playa propuesto por Kriebel y Dean (1993) y resume los resultados de la calibración y generalización del mismo obtenidos por el autor (Azuz, 1994, 1995) con la idea fundamen-

tal de que el método resulte lo suficientemente interesante para que se pueda validar ampliamente en nuestros litorales.

El método se aplicó originalmente a 4 perfiles de una serie de 24, tomados mensualmente durante un año en las bahías de Manzanillo y Santiago en el estado de Colima (González-Chavarin, 1989) y posteriormente se validó y calibró a partir de la información obtenida en perfiles de playa artificiales (Delft Hydraulics) y naturales (antes de tormenta y después de tormenta) en el Delta del Ebro en España (LIM-UPC, documento no publicado).

La contribución más importante de esta generalización (extensión al rango de los posibles valores que pueden tomar en la región las variables de estado del sistema, asociadas a la función de forzamiento erosivo) del método de convolución (Kriebel y Dean, 1993) es la elaboración de mapas predictivos para la respuesta o retroceso máximo que puede darse en los perfiles de playa, ante diferentes condiciones de forzamiento (i.e. sobre elevaciones del nivel del mar asociados al paso de tormentas y diferentes alturas de la ola en rompiente).

Dichos mapas presentan los posibles rangos de retroceso de los perfiles, en función de diferentes sobre-elevaciones del mar y tiempos de duración de las tormentas para varias alturas de ola. Se han simulado las condiciones tipo que pueden observarse de manera natural en el Pacífico mexicano. Estos mapas son de fácil interpretación y se espera que puedan ser usados por los encargados de administrar y gestionar la zona costera, con el fin de que sean tomadas medidas precautorias, de protección o reconstructivas ante el paso de un sistema tropical, con un mayor fundamento científico.

## El Método de convolución

El Método de convolución (Kriebel y Dean, 1993) se basa en el hecho observado experimentalmente de que las playas responden de manera aproximadamente exponencial en el tiempo ante condiciones de forzamiento estacionarias.

Diferentes experimentos de laboratorio (e.g. Swart, 1974; Dette y Uliczkza, 1983; Sunamura y Maruyama, 1987; Larson y Krauss, 1989) que partían de una playa originalmente plana sujeta a un oleaje estacionario, con un nivel del agua fijo, o bien en el caso de un perfil de equilibrio, sujeto a un incremento repentino en el nivel del agua conservando constantes las condiciones de rompiente, como lo han observado Kriebel y Dean (1985) y Larson y Krauss (1989), han mostrado que la respuesta de cualquier contorno de profundidad en función del tiempo  $R(t)$ , puede ser descrita por la siguiente ecuación (Kriebel y Dean, 1993).

(Ec. 2)

$$R(t) = R_{\infty} (1 - \exp(-t / T_s))$$

donde  $R_{\infty}$  es la respuesta máxima del contorno (avance o retroceso) que ocurre una vez que el sistema ha alcanzado el equilibrio,  $t$  es el tiempo y  $T_s$  es la escala temporal característica de la respuesta del perfil.

Como resultado de (Ec. 2), la ecuación diferencial que gobierna la respuesta exponencial de la playa ante condiciones de forzamiento estacionarias, viene dada por:

(Ec. 3)

$$\frac{dR(t)}{dt} = \frac{1}{T_s} [R_{\infty} - R(t)]$$

Siguiendo los planteamientos de Kriebel y Dean (1993) es posible establecer una ecuación similar a (Ec. 3) pero que tenga una forma más general, basándose en el hecho de que la respuesta de equilibrio de la playa ( $R_{\infty}$ ) varía de manera prácticamente lineal con el incremento en el nivel del agua, y que dicho cambio de nivel no modifica la razón o escala temporal de la respuesta del perfil.

Bajo esta suposición, es posible asumir una función de forzamiento erosiva dependiente del tiempo y generar una ecuación diferencial lineal que determine la respuesta de los perfiles ante variaciones en el nivel del agua, de la forma:

(Ec. 4)

$$\frac{dR(t)}{dt} = \frac{1}{T_s} [R_{\infty} f(t) - R(t)]$$

donde  $f(t)$  es la función de forzamiento dependiente del tiempo.

La solución de (Ec. 4) puede obtenerse por la convolución del forzamiento (dependiente del tiempo) y la solución característica del forzamiento estacionario, en este caso, una función exponencial.

En consecuencia, la solución dependiente del tiempo para la respuesta del perfil ( $R(t)$ ), puede ser expresada por medio de una integral de convolución, de acuerdo con Kriebel y Dean (1993) dicha ecuación tendría la forma:

(Ec. 5)

$$R(t) = \frac{R_{\infty}}{T_s} \int_0^t f(\tau) \exp[-(t-\tau) / T_s] d\tau$$

La ecuación (Ec. 5) sugiere dos características muy importantes de la respuesta de los perfiles de playa: la existencia de un desfase entre la respuesta del perfil de playa y la función de forzamiento erosional, y la presencia de un amortiguamiento entre la respuesta máxima que experimenta el perfil y nivel de erosión potencial.

Para obtener soluciones cerradas al sistema descrito por la ecuación (Ec. 5), en este trabajo se empleó la misma función de forzamiento propuesta por Kriebel y Dean (1993), debido a que reproduce de manera satisfactoria el comportamiento de las sobre-elevaciones del nivel mar asociada al paso de mareas meteorológicas; dicha función de forzamiento tiene la siguiente forma:

(Ec. 6)

$$f(t) = \text{sen}^2(\sigma t) \quad \forall \quad 0 \leq t \leq T_d$$

donde  $\sigma = \pi/T_d$  siendo  $T_d$  la duración total del evento (storm-surge).

Sustituyendo la forma funcional propuesta en (Ec. 6) en la ecuación de convolución (Ec. 5), se tendría:

(Ec. 7)

$$R(t) = \frac{R_{\infty}}{T_s} \int_0^t \sin^2(\sigma \tau) \exp\left(-\frac{(t-\tau)}{T_s}\right) d\tau$$

pudiéndose obtener la siguiente solución adimensional del sistema (ver anexo):

(Ec. 8)

$$\frac{R(t)}{R_{\infty}} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{1}{1+\beta^2} [\beta^2 \exp(-2\sigma t / \beta) + (\cos(2\sigma t) + \text{sen}(2\sigma t))] \right]$$

La solución (Ec. 8) depende solamente del parámetro  $\beta$  el cual se define como la razón entre la escala temporal de erosión y la duración de la tormenta, es decir:

(Ec. 9)

$$\beta = 2\pi \frac{T_s}{T_d} = \frac{2\sigma}{\alpha}$$

El valor temporal en el cual se da la máxima erosión ( $t_m$ ) se obtiene solucionando de manera iterativa (e.g. método de Newton-Raphson) la siguiente ecuación:

(Ec. 10)

$$\exp\left(\frac{-2\sigma t_m}{\beta}\right) = \cos(2\sigma t_m) - \frac{1}{\beta} \sin(2\sigma t_m)$$

El desfase ("lag") entre la máxima respuesta del perfil y el pico de la función de forzamiento viene dado por la relación:  $\text{lag} = \sigma t_m - \pi/2$  y la magnitud del valor pico de la respuesta erosiva máxima ( $R_{\text{max}}$ ) se puede obtener sustituyendo la ecuación (Ec. 10) en (Ec. 8), lo cual nos conduce a:

(Ec. 11)

$$\frac{R_{\text{max}}}{R_{\infty}} = \frac{1}{2} [1 - \cos(2\sigma t_m)]$$

La Figura 1, muestra un ejemplo (tomado de Kriebel y Dean, 1993) de la respuesta de un perfil de playa ante una función de forzamiento ideal (seno cuadrado) para dos casos. En el primero de ellos se muestra la respuesta ante un huracán de corta duración ( $\beta = 27\pi/8 = 10.6$ ) y en el segundo ante un Norte de larga duración (i.e.  $\beta = 16\pi/66 = 0.76$ ).

La Figura 2, muestra de manera gráfica la definición de la amplitud y el desfase que presenta la máxima erosión del sistema respecto a la respuesta de equilibrio.

La máxima erosión potencial que puede alcanzar un perfil de playa ( $R_{\alpha}$ ) puede ser definida de manera geométrica/esquemática para muchas condiciones. En este trabajo se emplean cuatro formas ideales de perfil, basadas en las definiciones propuestas por Kriebel y Dean (1993):

- a) Perfil de playa con berma cuadrada
- b) Perfil de playa con pendiente en su cara
- c) Perfil con duna sin post-playa
- d) Perfil con duna y post-playa

La figura 3, muestra los esquemas de cada tipo de perfil teórico con la expresión correspondiente para el cálculo del máximo retroceso potencial ( $R_{\alpha}$ ).

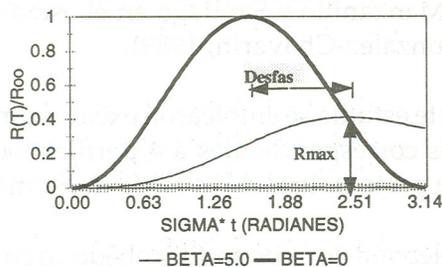


FIG. 1 RESPUESTA TEMPORAL. TORMENTA IDEAL.

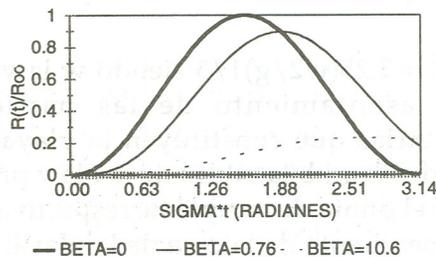


FIG. 2 DEFINICION. AMPLITUD DE RESPUESTA.

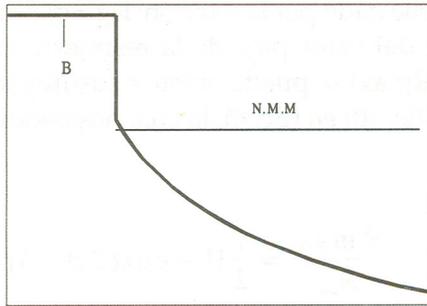


FIG. 3A PERFIL TIPO "BERMA CUADRADA".

$$R_{\infty} = \frac{S X_b}{B + h_b - \frac{S}{2}}$$

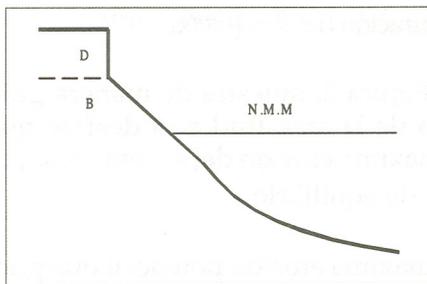


FIG. 3C PERFIL CON DUNAS.

$$R_{\infty} = \frac{S(X_b - \frac{h_b}{m})}{B + D + h_b - \frac{S}{2}}$$

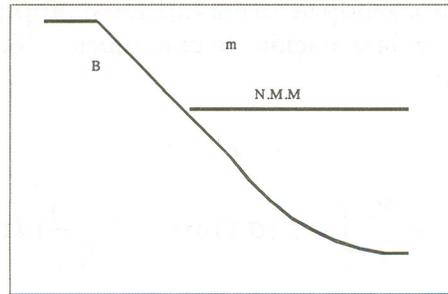


FIG. 3B PERFIL PENDIENTE CARA DE LA PLAYA.

$$R_{\infty} = \frac{S(X_b - \frac{h_b}{m})}{B + h_b - \frac{S}{2}}$$

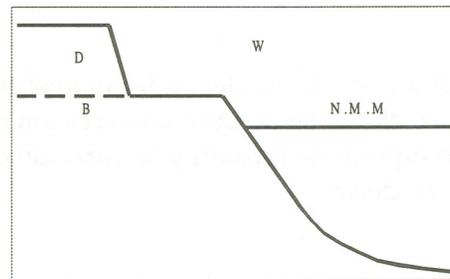


FIG. 3D PERFIL CON DUNA Y "BACKSHORE".

$$R_{\infty} = \frac{S(X_b - \frac{h_b}{m}) - W(B + h_b - \frac{S}{2})}{B + D + h_b - \frac{S}{2}}$$

Finalmente se debe mencionar que el método seguido, emplea la ecuación empírica propuesta por Kriebel y Dean (1993) para calcular la escala temporal de erosión.

(Ec. 12)

$$T_s = C_1 \frac{H_b^{1.5}}{\sqrt{g} A^3} \left(1 + \frac{h_b}{B + D} + \frac{m X_b}{h_b}\right)^{-1}$$

donde  $A = 2.25(w^2/g)^{1/3}$  siendo  $w$  la velocidad de asentamiento de las partículas sedimentarias que constituyen la playa,  $g$  la gravedad,  $H_b$  y  $h_b$  la altura de la ola y profundidad en el punto de rompiente respectivamente,  $m$  la pendiente de la cara de la playa,  $X_b$  el ancho de la zona de "surf" (el cual depende de la geometría del perfil),  $B$  la altura de la berma,

$D$  la altura de la duna y  $C_1$  una constante de calibración, obtenida a partir de experimentos numéricos.

### Metodología y trabajo experimental

Durante 1987 y 1988, se realizaron levantamientos mensuales de 25 perfiles de playa en las bahías de Manzanillo y Santiago en el estado de Colima (González-Chavarín, 1989).

En este estudio se emplearon exclusivamente los datos correspondientes a 4 perfiles localizados en la parte central de la bahía de Santiago.

La selección de estos perfiles obedeció en primer lugar a la orientación de los mismos, la cual los dejaba expuestos al oleaje energético producido por

tormentas tropicales provenientes de la dirección sur. En segundo lugar, al emplear los datos correspondientes a la posición de la línea de orilla durante el periodo de muestreo y tras obtener la matriz de correlación espacio-temporal de las elevaciones de los perfiles y efectuar el análisis de grupos, se observó que 3 de los perfiles seleccionados podían ser agrupados con un alto grado de correlación, lo cual resultaba importante pues se buscaba predecir el comportamiento de áreas de respuesta homogénea.

Una vez seleccionados los perfiles, se consideraron exclusivamente aquellos meses del muestreo en los cuales la geometría de los mismos coincidiera con los perfiles teóricos propuestos por Kriebel y Dean (1993).

Ante la carencia de información hidrodinámica local, se emplearon las características geomorfológicas de los perfiles selectos y las relaciones propuestas por Takeda y Sunamura (1982) para tener estimaciones de las condiciones hidrodinámicas promedio (barra superior) que pudieron haber dado forma a dichos perfiles.

Las relaciones de Takeda y Sunamura (1982) pueden ser escritas como:

(Ec. 13)

$$B = 0.125 \bar{H}_b^{5/8} (g \bar{T}^2)^{3/8} \quad m = \frac{0.12}{\sqrt{\bar{H}_b} / \sqrt{g \bar{T}} \sqrt{D_{50}}}$$

donde  $T$  es el periodo de la ola,  $D_{50}$  el diámetro promedio de las partículas y  $g$  la aceleración de la gravedad (las demás variables corresponden a las mostradas en la figura 3).

La Tabla I, muestra las características de los perfiles selectos y los meses empleados en este análisis.

Con la ayuda de esta información, se aplicó el Método de Convolución usando la geometría de cada perfil seleccionado (i.e. P4, P5, P6 y P7) con los valores de la altura de la ola en rompiente y periodo estimados con la ecuación (Ec. 13) y asumiendo sobre elevaciones del nivel del mar por efecto de tormentas de 1 a 3 metros con duraciones de 10 a 60 horas (estos valores de  $S$  y  $T_d$  son típicos de la región de estudio). La fun-

ción de forzamiento seleccionada para este análisis fue una función seno cuadrática con amplitud unitaria.

Con esta información se calcularon diferentes mapas del retroceso máximo mayor para cada perfil (P4, P5, P6 y P7) y para el área constituida por los 4 perfiles asumiéndola como una zona de respuesta homogénea (ver Azuz, 1995).

A partir de la geometría de los perfiles selectos para el estudio, se determinó, de acuerdo con la configuración teórica, que el tipo más común era el correspondiente al "Tipo B" (perfil con pendiente en la cara de la playa). Una vez identificada la forma predominante del perfil, se calcularon los valores promedio de la berma y de la pendiente que presentaba la región comprendida por los 4 perfiles.

Usando esta información se construyeron tres perfiles teóricos: el primero (PT1) con la altura promedio de la berma, el segundo (PT2) con la pendiente promedio. En ambos casos, la posición promedio de la línea de costa (considerando toda la bahía y todo el periodo de muestreo) se preservó. El tercer tipo de perfil teórico (PT3) consideró tanto la berma como la pendiente promedio, pero se modificaba la posición de la línea de orilla.

Estos tres perfiles teóricos generaron la información geomorfológica necesaria para obtener los mapas del retroceso máximo de la línea de orilla para diferentes condiciones de sobre elevaciones ( $S$ ) y tiempos de duración de las tormentas ( $T_d$ ), para diferentes condiciones de oleaje ( $hb = 1, 2$  y  $3$  m).

De forma independiente, se efectuó la validación/calibración del método de convolución (Azuz, 1994) empleando información experimental de laboratorio y de campo.

El experimento de laboratorio se basó en un perfil artificial con  $D = 0.9$  m,  $B = 0.7$  m y  $m = 0.125$  sometido a una sobre-elevación del nivel del agua  $S = 0.5$  m con  $h_b = 1.1584$  m durante 18 h, registrándose su geometría a las 0 h y a las 18 h de acción continua de oleaje.

Tabla I. Características de los perfiles empleados en el estudio.

PERFIL 4

MESES	FORMA TEORICA	B (m)	D (m)	W (m)	m	MRP (m)
ENERO 87	D	2.413	0.275	5.000	0.0950	10.00
FEBRERO	D	2.373	0.297	2.170	0.0553	10.00
MARZO	D	3.923	0.280	5.000	0.0485	10.00
ABRIL	B	3.843			0.1680	15.00
DICIEMBRE	B	2.983			0.0553	9.60

PERFIL 5

MESES	FORMA TEORICA	B (m)	D (m)	W (m)	m	MRP (m)
ENERO 87	B	4.442			0.0785	15.00
MAYO	B	4.192			0.0595	15.00
JUNIO	B	4.152			0.1310	15.00
SEPTIEMBRE	D	4.482	0.490	2.400	0.1990	7.40
OCTUBRE	B	4.622			0.1740	7.25
NOVIEMBRE	B	4.562			0.1320	7.50
DICIEMBRE	B	4.662			0.1075	7.50
ENERO 88	B	4.582			0.0932	7.50

PERFIL 6

MESES	FORMA TEORICA	B (m)	D (m)	W (m)	m	MRP (m)
ENERO 87	D	3.207	0.785	14.200	0.0779	10.00
FEBRERO	D	3.227	0.770	11.400	0.0437	10.00
MARZO	D	3.207	0.780	12.970	0.0564	10.00
ABRIL	D	3.447	0.785	10.000	0.0600	10.00
MAYO	D	3.707	0.600	10.000	0.0556	10.00
JUNIO	D	3.287	0.820	4.980	0.0784	10.00
AGOSTO	B	4.627			0.0723	13.77
SEPTIEMBRE	B	3.652			0.0673	15.00
OCTUBRE	D	2.657	2.000	20.000	0.0612	10.00
NOVIEMBRE	B	4.312			0.1560	10.55
DICIEMBRE	B	3.572			0.1480	25.00
ENERO 88	B	3.967			0.0920	14.68

PERFIL 7

MESES	FORMA TEORICA	B (m)	D (m)	W (m)	m	MRP (m)
ENERO 87	B	3.615			0.1650	12.45
MARZO	B	3.250			0.0616	15.75
MAYO	B	3.545			0.2020	11.10
NOVIEMBRE	B	4.300			0.2187	3.46

B = Altura de la Berma

D = Altura de la Duna

W = Ancho del Backshore.

m = Pendiente de la cara de la playa.

MRP = Máximo Retroceso Permisible bajo condiciones de campo

(Límite de la berma a las construcciones).

Los valores medidos del volumen erosionado por arriba de la sobre elevación del agua y los calculados con el método de convolución diferían en un 20%, mientras que dichos volúmenes considerados a partir del nivel original del agua solamente difirieron en un 5%.

Para la validación experimental con datos de campo, se utilizaron dos perfiles medidos en el Delta del Ebro en España (P23 y P24), en los meses de julio y diciembre de 1992. Dichos perfiles fueron seleccionados por su ubicación (se podía asumir que las modificaciones de los mismos sólo respondían al transporte de partículas en dirección normal a la costa) y por haber sufrido los efectos de una marea meteorológica.

La información sobre el oleaje registrada en la zona permitió calcular la altura y profundidad de rompiente, la cual fue de 2.8 m para la duración de la tormenta registrada (96 h), y se midió una sobre elevación del mar de 0.45 m.

Los perfiles seleccionados se clasificaron siguiendo los modelos teóricos como: "perfil con pendiente en la cara de playa".

Los resultados calculados a partir de los perfiles del Ebro y los cálculos efectuados con el método de convolución dieron diferencias en volúmenes erosionados (por arriba del nivel del mar original y por arriba de la sobre elevación) de entre 5 y 40% de diferencia, siendo en todos los casos de los mismos ordenes de magnitud tanto los volúmenes erosionados como los retrocesos máximos de la berma (teóricos y medidos).

Los anteriores resultados resultan ser bastante satisfactorios desde el punto de vista de la ingeniería de costas y dieron la confianza suficiente para efectuar la generalización del método de convolución (mapas predictivos de máximo retroceso) que aquí se describe.

## Resultados

El principal resultado que se presenta en este artículo son los mapas predictivos para el retroceso máximo de los perfiles de playa creados de manera teórica, los cuales contienen la información prome-

dio de las características geomorfológicas de una zona considerada como de respuesta homogénea ante el paso de tormentas.

En el caso de los perfiles medidos (Azuz, 1995), los mapas predictivos se generaron graficando el valor más alto de los retrocesos máximos registrados para cada perfil (sin distinción de su forma) durante el periodo de muestreo, en función de las condiciones hidrodinámicas estimadas con las relaciones de Takeda y Sunamura (1982).

Para los perfiles teóricos, los mapas predictivos se generaron usando la información promedio de la berma y la pendiente de la cara de la playa usando como forma predominante la del "perfil con pendiente en la cara de la playa" (tipo B), para tres diferentes condiciones de profundidad de rompiente (1, 2 y 3 m) correspondientes a alturas de ola de 0.78, 1.56 y 2.34 m respectivamente.

Se presentan los mapas predictivos de la magnitud del retroceso máximo posible ( $R_{max}$ ) en función de diferentes niveles de sobre elevaciones "S" (desde 1 hasta 3 m) y para tormentas de diferente duración " $T_d$ " (desde 10 hasta 60 h).

La figura 4, muestra el comportamiento esperado del perfil teórico 3 (el cual se genera asumiendo los valores promedio de "B" y "m" registrados en los perfiles de campo los meses que presentaron la forma teórica) con alturas de ola en rompiente de 0.78 m. Se observa que el máximo retroceso que puede experimentar el perfil es del orden de 40 cm.

La figura 5, muestra el comportamiento esperado del perfil teórico 3 considerando una profundidad de rompiente de 2 m, en este caso se debe notar que para sobre-elevaciones del nivel del mar del orden de los 3 m y tormentas con duración superior a las 40 h se pueden dar retrocesos máximos de la berma del perfil del orden de los 3.5 m.

La figura 6, muestra nuevamente al perfil teórico 3 sujeto a condiciones energéticas de oleaje (i.e.  $hb=3$  m) en este caso se observan retrocesos máximos hasta del orden de los 10 m.

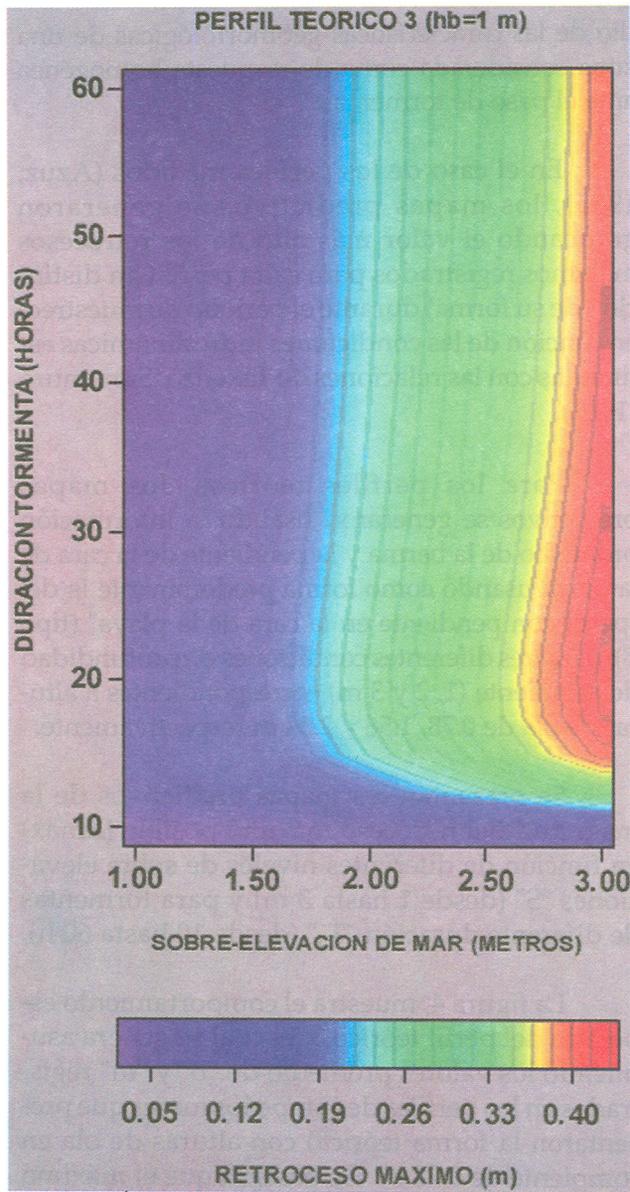


FIG.4 PERFIL TEÓRICO 3.

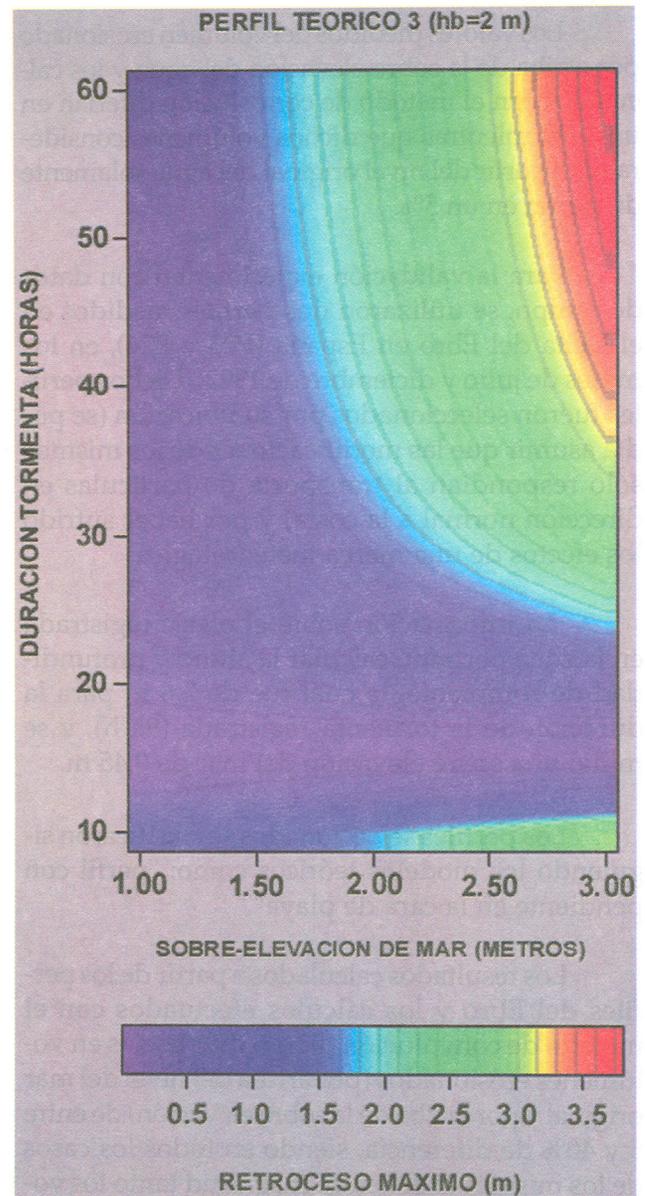


FIG.5 COMPORTAMIENTO ESPERADO DEL PERFIL TEORICO 3.

La Tabla II, muestra de manera resumida la información obtenida en esta investigación. Se presentan los valores máximos y mínimos del retroceso máximo que pueden experimentar los perfiles (calculados usando el método de convolución) y las condiciones que generan dichos valores (sobre-elevación del mar y duración de la tormenta) usando la información de todo el periodo de muestreo, tanto para los perfiles medidos en el campo como para los generados de manera teórica. Para el último tipo de perfiles (i.e. teóricos) se asumen diferentes condiciones de oleaje en rompiente, mientras que para el primer tipo, se aplican las condiciones

hidrodinámicas calculadas en función de las relaciones de Takeda y Sunamura (1982).

Resulta importante contrastar los valores del RMP mostrados en la Tabla I con los valores de  $R_{max}$  y las condiciones ( $S$ ,  $T_d$ ,  $hb$ ) asociadas a los mismos, que se presentan en la Tabla II.

## Conclusiones

El Método de Convolución (Kriebel y Dean, 1993) es una herramienta útil para predecir la respuesta temporal que experimentan los perfiles de playa ante diferentes condiciones de fuerza-

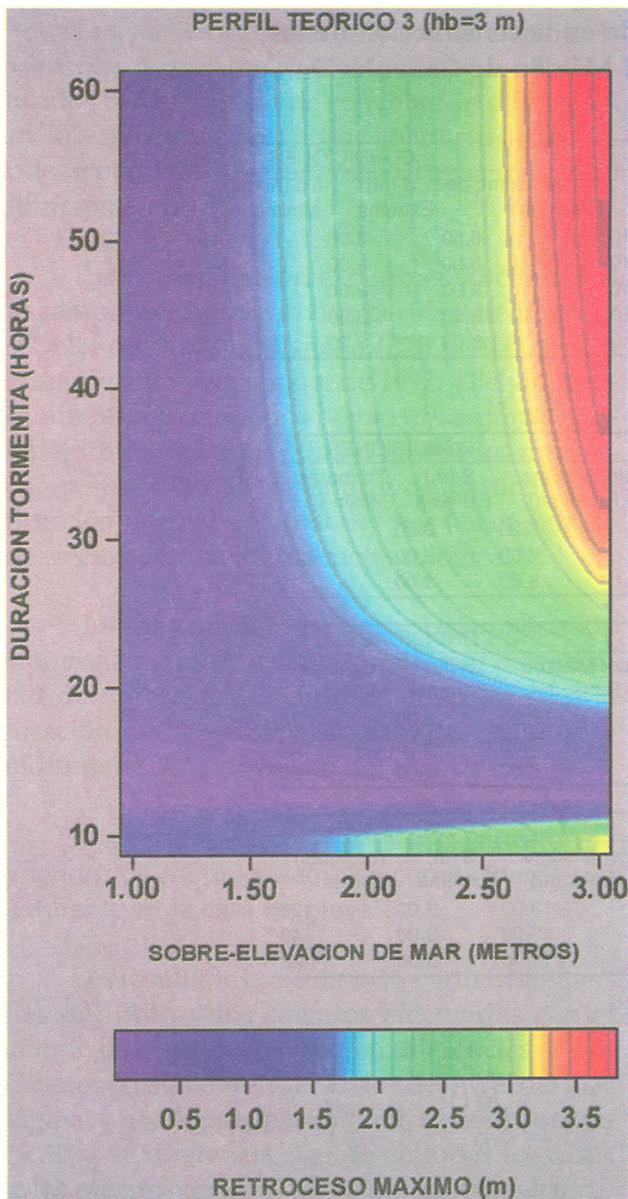


FIG. 6 PERFIL TEÓRICO 3, CON RETROCESOS MÁXIMOS DEL ORDEN DE LOS 10m.

miento, siendo lo suficientemente exacta para ser empleada en trabajos relacionados con la ingeniería de costas. Este método requiere, en primer lugar, ser calibrado para las condiciones existentes en cada zona específica.

Los mapas predictivos, basados en el método anteriormente citado, resultan ser una importante herramienta de gestión costera puesto que permiten predecir con un nivel de confiabilidad aceptable las modificaciones que pueden ocurrir en la zona litoral. A partir de la información que ellos brindan se pueden diseñar estrategias de protección o regulación de la zona

litoral tomando en consideración y clasificando las regiones de mayor y menor riesgo erosivo en función de la geometría de la playa.

Es muy importante resaltar el desfase existente entre el valor máximo de la función de forzamiento y la respuesta erosiva del perfil (ver figura 2). Esta diferencia, la cual es del orden de horas para los casos aquí presentados, pudiera ser la clave para tomar medidas efectivas de protección ante la inminente ocurrencia de un huracán, por ejemplo, incrementando la altura de la berma o duna (teniendo preparados depósitos de arena en las zonas más sensibles) o bien suavizando la pendiente de la playa (usando maquinaria pesada).

### Agradecimientos

Se agradece la información y apoyo brindado por: Oceanóloga Irma González Chavarin de la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad de Colima; Dr. Agustín Sánchez Arcilla, Dr. José Jimenez, Ing. Vicents Gracia y al equipo de morfodinámica del Laboratorio de Ingeniería Marítima de la Universidad Politécnica de Cataluña (LIM-UPC).

Igualmente se agradece el apoyo que en diferentes momentos han brindado a esta investigación: la organización BORDOMER de Francia, el Centro de Enseñanza Técnica y Superior CETYS-Universidad y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México CONACYT (Proyecto I-29903 T).

**Tabla II. Información general obtenida en la construcción de los mapas de contornos generados con el Método de Convolución.**

**PERFILES MEDIDOS**

Número de Perfil	Valor Mínimo de Rmax (m)	CONDICIONES			CONDICIONES		
		S (m) Extrema	Td (horas) Mínima	Valor Máximo de Rmax (m)	S (m) Extrema	Td (horas) Mínima	
P4	2.00	1.20	10	6.50	3.00	19	
P5	1.60	1.10	10	6.00	3.00	48	
P6	2.00	1.03	10	9.00	3.00	45	
P7	3.50	1.04	10	12.50	3.00	38	
P4-P7	2.00	1.05	8	8.00	3.00	18	

**PERFILES TEÓRICOS**

Numero de Perfil	CONDICIONES			CONDICIONES		
	Valor Mínimo de Rmax (m)	S (m) Extrema	Td (horas) Mínima	Valor Máximo de Rmax (m)	S (m) Extrema	Td (horas) Mínima
PT1	0.60	1.10	10	7.20	3.00	10
PT2	0.40	1.30	10	7.00	3.00	20
PT36	0.10	1.10	10	6.00	3.00	10

Numero de Perfil	CONDICIONES			CONDICIONES		
	Valor Mínimo de Rmax (m)	S (m) Extrema	Td (horas) Mínima	Valor Máximo de Rmax (m)	S (m) Extrema	Td (horas) Mínima
PT1	2.00	1.00	10	7.20	3.00	18
PT2	2.00	1.30	10	7.00	3.00	30
PT36	1.60	1.10	10	6.00	3.00	50

Numero de Perfil	CONDICIONES			CONDICIONES		
	Valor Mínimo de Rmax (m)	S (m) Extrema	Td (horas) Mínima	Valor Máximo de Rmax (m)	S (m) Extrema	Td (horas) Mínima
PT1	3.50	1.10	10	13.00	3.00	28
PT2	2.50	1.00	10	13.00	3.00	43
PT36	3.00	1.20	10	11.00	3.00	28

**Anexo (Resumen Matemático)**

La solución de la ecuación diferencial que determina la respuesta temporal del contorno de un perfil de playa (Ec. 4) es posible obtenerla formalmente por medio de la transformada de Laplace; sin embargo, también es posible solucionarla efectuando la convolución de la solución en el caso estacionario (comportamiento exponencial) con la función de forzamiento dependiente del tiempo (seno cuadrático de amplitud unitaria).

Si se define  $\sigma$  y se factoriza el término exponencial extrayendo la parte que no depende de la variable de integración ( $t$ ), la ecuación 7 puede escribirse como:  $\sigma = 1/T_s$  y se factoriza el término exponencial extrayendo la parte que no depende de la variable de integración ( $\tau$ ), la ecuación 7 puede escribirse como:

$$\frac{R(t)}{R_\infty} = \alpha e^{-\alpha t} \int_0^t \text{sen}^2(\sigma \tau) e^{\alpha \tau} d\tau$$

Usando la fórmula 1.465 de Spiegel y Abellanas (1988) con  $a = \alpha$ ,  $b = \beta$  y  $n = 2$  y una vez evaluada la expresión resultante en los límites de integración se obtiene:

$$\frac{R(t)}{R_\infty} = \alpha e^{-\alpha t} \left[ \frac{e^{\alpha t} \text{sen}(\sigma t)}{\alpha^2 + 2^2 \sigma^2} (\alpha \text{sen}(\sigma t) - 2\sigma \cos(\sigma t)) + \frac{2\sigma^2 e^{\alpha t}}{\alpha(\alpha^2 + 2^2 \sigma^2)} - \frac{2\sigma^2}{\alpha(\alpha^2 + 2^2 \sigma^2)} \right]$$

Simplificando la anterior ecuación y aplicando las relaciones:

$$\text{sen}^2(A) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(2A)$$

$$\text{sen}(2A) = 2 \text{sen}(A) \cos(A)$$

al primero y segundo termino es posible obtener después de algunos pasos elementales de álgebra la relación:

$$\frac{R(t)}{R_{\infty}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha^2 + 2^2 \sigma^2}{\alpha^2 + 2^2 \sigma^2} - \frac{1}{\alpha^2 + 2^2 \sigma^2} (\alpha^2 \cos(2\sigma t) + 2\alpha\sigma \sin(2\sigma t)) - \frac{2^2 \sigma^2}{\alpha^2 + 2^2 \sigma^2} e^{-\alpha t} \right)$$

Si se define el parámetro  $\beta = 2\sigma/\alpha$  es posible llevar la anterior ecuación a la forma final (correspondiente a la ecuación 8):

$$\frac{R(t)}{R_{\infty}} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{1}{1 + \beta^2} (\cos(2\sigma t) + \beta \sin(2\sigma t)) - \frac{\beta^2}{1 + \beta^2} e^{-\alpha t} \right)$$

Para determinar el tiempo de máxima erosión, la anterior ecuación se deriva respecto al tiempo y se iguala con cero para obtener:

$$e^{-\alpha t_m} = \cos(2\sigma t_m) - \frac{1}{\beta} \sin(2\sigma t_m)$$

Recordando que es posible escribir  $\alpha\beta^2 = 2\alpha\beta$  y después de algunas simplificaciones algebraicas, es posible obtener la ecuación 10, la cual puede ser escrita como:

$$e^{-\alpha t_m} = \cos(2\sigma t_m) - \frac{1}{\beta} \sin(2\sigma t_m)$$

La anterior ecuación puede resolverse de manera iterativa para encontrar el tiempo de ocurrencia de la máxima erosión, es decir, el valor de  $t_m$ .

Para obtener el máximo retroceso que puede experimentar el perfil  $R(t_m) = R_{\max}$  asociado al tiempo de mayor erosión (ecuación 11) se sustituye el término exponencial de la anterior relación en la ecuación 8 y después de simplificaciones algebraicas es posible obtener la ecuación (11).

## Bibliografía

Azuz, I. 1994. *Método de Convolución* (Kriebel y Dean, 1993). (Reporte Interno de Resultados). Laboratorio de Ingeniería Marítima-Universidad Politécnica de Cataluña (LIM-UPC), Barcelona, España. 30 pp.

Azuz, I. 1995. Predictive application of the convolution method for time-dependent beach profile response in one Mexican bay. *Proc. Int. Conf. "Coastal Change 95"*, Bordomer-IOC, Bordeaux: 204-216.

Azuz, I. 1997. *Revisión Sobre el Estado del Arte en el Modelado Morfodinámico*. Publications 97001, LIM-CIIRC. International Centre for Coastal Resources Research. 280 pp.

Bruun, P. 1962. Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Jour. Waterways Harbors Div., ASCE*, 88(WW1): 117-130.

Dally, W. y R. Dean. 1984. Suspended sediment transport and beach profile evolution. *Jour. Waterw., Port, Coast. And Ocean Eng.*, 110(1): 15-33.

Dean, R. 1976. Beach erosion: Causes, processes, and remedial measures. *CRC Reviews in Environmental Control*, CRC Press, 6(3): 259-296.

Detle, R. y K. Uliczka. 1987. Prototype investigation on time-dependent dune recession and beach erosion. *Coastal Sediments*, 87: 1430-1444.

Edelman, T. 1972. Dune erosion during storm conditions. *Proc. 13th Conf. Coastal Eng.*: 1305-1312.

González-Chavarín, I. 1989. *Dinámica de la línea de costa en base a cambios anuales en el perfil de playa en las bahías de Manzanillo y Santiago*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad de Colima, Colima, México.

Griggs, G. y K. Brown. 1998. Erosion and shoreline damage along the central California coast: A comparison between the 1997-98 and 1982-83 ENSO Winters. *Shore & Beach*, 66(3): 18-23.

Holman, R. y A. Sallenger. 1986. High energy nearshore processes. *EOS Transactions, AGU*, 67(49): 1369-1371.

Komar, P. 1998. The 1997-98 El Niño and erosion fo the Oregon coast. *Shore & Beach*, 66(3): 33-41.

Kriebel, D. y R. Dean. 1985. Numerical simulation of time-dependent beach and dune erosion. *Coastal Eng.*, 9: 221-245.

Kriebel, D. y R. Dean. 1993. Convolution method for time-dependent beach-profile response. *Jour. Waterw., Port, Coast. and Ocean Eng.*, 119 (2) : 204-226.

Kriebel, D., N.C.Kraus y M. Larson. 1991. Engineering Methods for predicting beach profile response. *Coastal Sediments*, 91: 557-571.

Larson, M. y N. Krauss. 1989. *SBEACH: Numerical model to simulate storm-induced beach change*. (Tech. Report CERC-89-9), U.S. Army Corps of Engineers.

Nairn, R. y H. Southgate. 1993. Deterministic profile modelling of nearshore processes. Part 2. Sediment transport and beach profile development. *Coastal Eng.*, 19: 57-96.

Russell, P. 1993. Mechanisms for beach erosion during storms. *Continental Shelf Research*, 13(11): 1243-1265.

Takeda, I. y T. Sunamura. 1982. Formation and height of berms. *Trans. Japan. Geomorphological Union*, 3: 145-157 (en Japonés). También en: Sunamura, T. 1989. "Sandy beach geomorphology elucidated by laboratory modelling", In: V. Lakhan y A. Trenhaile (Eds.), *Applications in Coastal Modelling*, Elsevier, p. 159-213.

Van de Graaff, J. 1983. Probabilistic design of dunes. *Proc. Coastal Structures*, 83: 820-831.

Vellinga, P. 1982. Beach and dune erosion during storm surges. *Coastal Eng.*, 6: 361-389.

Vellinga, P. 1983. *Verification of predictive computational model for beach and dune erosion during storm surges*. Delft Hydraulics Lab., Delft Univ. Technol.

Wen-Juinn, Ch. y K. Ching-Ton. 1991. "Numerical model of beach profile changes". In: *Computer Modelling in Ocean Engineering 91*, Arcilla, As. et al. (Eds.), Balkema, Rotterdam p. 219-225.