

Perfil dinámico de una playa

JOSÉ M. DE LA PEÑA OLIVAS (*) y FRANCISCO J. SÁNCHEZ PALOMAR (**)

RESUMEN A lo largo del año 2009 el CEDEX, por encargo de la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar, realizó un informe técnico, dividido en dos partes que estudió y analizó los perfiles de diversas playas de las costas españolas. En este artículo se presenta un resumen de los trabajos efectuados con motivo de este trabajo sobre el comportamiento de los perfiles de playa y la adaptación de diversa teorías a ellos, proponiendo finalmente un modelo teórico de perfil que más se ajustaba a lo observado en ellas y proponiendo un tratamiento dinámico del perfil, en lugar de aquellos que lo estudiaban y trataba de manera estática.

DYNAMIC PROFILE OF A BEACH

ABSTRACT Throughout the year the 2009 CEDEX, by order of the Main Directorate of Sustainability of the Coast and the Sea, realised a technical report, divided in two parts that studied and analyzed the beach profiles diverse of the Spanish coasts. In this article a summary of the work carried out on the occasion of this work appears on the behaviour of the beach profiles and the diverse adaptation of theories to them, finally proposing a theoretical model of profile that adjusted more to the observed thing in them and proposing a dynamic treatment of the profile, instead of they studied which it and dealt with static way.

Palabras clave: Perfiles de playa, Perfil de equilibrio.

Keywords: Beach profile, Equilibrium profile.

1. INTRODUCCIÓN

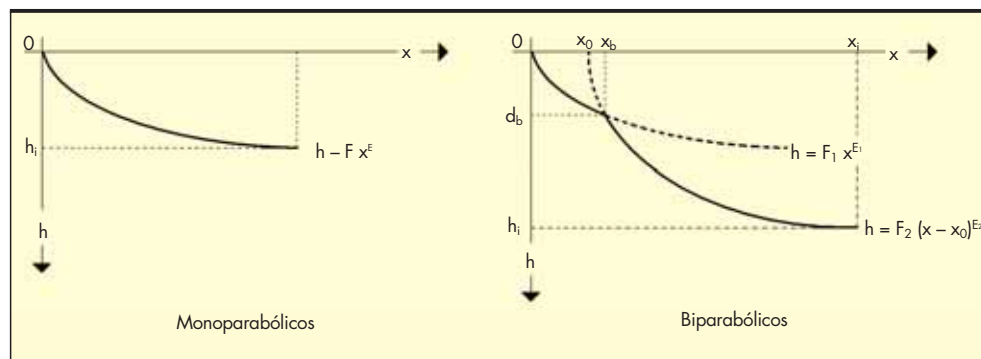
Cuando nos proponemos estudiar un perfil de playa e intentamos conocer la forma que tiene, recurrimos a diversas teorías que lo intentan predecir y determinar. Estas teorías de predicción de forma del perfil, pueden generalizarse en cuatro tipos:

- Monoparabólicos
- Biparabólicos

- Exponenciales
- Racionales

Esta generalización es esencial para poder abordar la comparación de cada uno de ellos con los datos en la naturaleza. Los datos tomados fueron los que se midieron en diversas campañas realizadas por el CEDEX a lo largo del tiempo; siendo de las siguientes playas: Salinas, Peñíscola, Malagueta, San

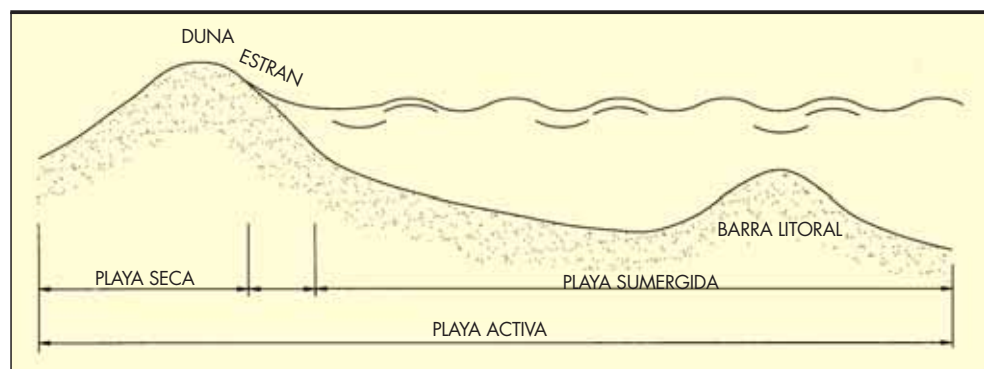
FIGURA 1. Esquema de los perfiles teóricos mono y bi parabólicos.



(*) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Coordinador del Programa Técnico Científico de Dinámica Litoral del Área de Costas del Centro de Estudios de Puertos y Costas CEDEX.

(**) Ingeniero Técnico de Obras Públicas, Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

FIGURA 2. Partes del perfil de playa próximo a la costa, a partir de las rompientes (Peña y Otero, 1990).



Andrés y Campello. El análisis del perfil se ha hecho en la zona donde existe movimiento de material, para lo cual se ha tenido que identificar los límites del perfil. Posteriormente, se analiza el llamado perfil de equilibrio, y el tratamiento que diversos autores han supuesto de éste. Con ello se alcanza a estudiar lo que es el concepto de perfil estático y dinámico, y en esta última acepción se tiene que tener en cuenta sus estados extremos y las variables representativas y con ello estaremos en condiciones de poder analizar la adaptación que las diversas teorías a los perfiles reales de una playa.

2. ZONIFICACIÓN Y LÍMITES DEL PERFIL

Desde el punto de vista de su perfil, pueden distinguirse diferentes tipos de playa: playa completa, playa sustentada (cuando la playa se apoya en un pie sumergido, sea natural o artificial) y playa sumergida (cuando no existe playa seca).

Teniendo en cuenta una playa completa, la zonificación de un perfil de playas, atendiendo a sus características morfodinámicas, puede ser:

- Playa seca o zona de tierra.
- Playa sumergida o zona de mar.
- Estrán o zona intermareal.

La zona de playa seca es la zona donde no alcanza el mar y por tanto el material sedimentario se encuentra seco. Está compuesto por la duna y la berma de la playa. La duna constituye el material de reserva de la playa, mientras que la berma suele estar formada por dos o más plataformas que corresponden a los temporales más frecuentes, siendo la más baja la existente en período de bonanza.

La playa sumergida es el tramo del perfil más estudiado y donde los diferentes autores han intentado representarla definiendo diferentes curvas que sirvan para aproximar el perfil de la playa. Su estructura más general es una curva cóncava, que dependiendo de la época del año y de la situación geográfica pueden tener una o varias barras. La zona entre la barra y la línea de orilla se denomina seno por la forma cóncava que suele presentar.

El estrán está compuesto por aquellos tramos que se encuentran alternativamente secos o mojados debidos a la marea o al oleaje de ese momento. El material sedimentario se encuentra húmedo, por lo que a esta zona se la denomina playa mojada.

Las zonas anteriores no son fijas a lo largo del año, ni siquiera, en muchas ocasiones, a lo largo de un día. La zona de mar, de tierra y la intermareal cambian continuamente dependiendo del oleaje, de la marea astronómica, de la marea meteorológica, de los temporales y de las características del sedimento de la playa.

La playa seca, para un mismo sedimento, al aumentar el oleaje y los niveles de marea reduce su superficie y origina diferentes bermas acordes al nivel del mar existente. Para el caso anterior, la zona intermareal aumenta, al igual que la playa sumergida; ya que, al aumentar el oleaje aumenta la profundidad a la que los fondos de la playa son afectados por el mismo.

Todo lo anterior, muestra que al hablar del perfil de una playa hay que tener en cuenta la época del año en que se tomó el perfil y las características del clima marítimo anteriores a la obtención de los datos; que a su vez depende de si el perfil se tomó en una temporada con clima marítimo estable, o si se realizó el trabajo tras un temporal. Y todo esto, independientemente de si el perfil corresponde a la zona central de una playa abierta, o a una playa más o menos cerrada por cabos naturales o por obras artificiales; puertos, espigones, etc., que también influyen en la forma final del perfil.

El perfil de playa es un elemento dinámico que varía continuamente con el tiempo y que depende, como se ha dicho, de las características del sedimento y del clima marítimo. Esto hace que al hablar de perfiles de playa sea muy importante definir los límites entre los que se puede mover el perfil, no es suficiente conocer el perfil un momento dado, tanto si corresponde a un período de bonanza, como a un período de temporal o a uno intermedio.

El límite de la zona de tierra depende del oleaje y de las sobrelevaciones del nivel del mar de todo tipo que puedan presentarse, por lo que se debería de hablar de perfil límite en tierra asociado a un período de retorno para unas condiciones de clima marítimo determinado.

El límite del perfil sumergido depende de la profundidad de cierre del perfil, que a su vez depende del oleaje de temporal que se considere, por lo que el límite sumergido también está relacionado con el período de retorno del oleaje de temporal.

Es decir, los límites del perfil de una playa se mueven; tanto los límites de tierra, como sumergidos, en unos intervalos que hay que conocer y donde se deben determinar las probabilidades de presentación de un tipo determinado de perfil.

3. DEFINICIONES DEL PERFIL DE EQUILIBRIO A LO LARGO DEL TIEMPO

A lo largo del tiempo los diferentes autores, que se han ocupado del estudio del comportamiento de los perfiles de playa, han definido el concepto de perfil de equilibrio. En este apartado se presenta un resumen de algunas de las definiciones utilizadas para el perfil de equilibrio.

3.1. FENNEMAN (1902):

Es la referencia más antigua, que ya recogió Bruun en el año 1954, y que versa:

"There is a profile of equilibrium which the water would ultimately impart if allowed to carry its work to completion. The continual change of shoreline and the supply of new drift are everchanging conditions with which no fixed form can be in equilibrium. There are, however, certain adjustments of current, slope and load which, when once attained, are maintained with some constancy. The form involved in their adjustments is commonly known as the profile of equilibrium. When this profile has once been assumed the entire form may slowly shift its position toward or from the land, but its slope will change little or not at all."

Cuya traducción sería:

"Hay un perfil de equilibrio que el mar finalmente generará si se le permitiera llevar a cabo su trabajo completamente. Los continuos cambios de la línea de costa y de los arrastres sedimentarios cambian las condiciones por lo que una forma fija no puede estar en equilibrio. Sin embargo, hay momentos en que se obtiene cierta estabilidad en las corrientes, pendientes y cargas sedimentarias. La forma alcanzada en estas circunstancias es comúnmente conocida como perfil de equilibrio. Cuando este perfil ha sido asumido la forma entera puede mover lentamente su posición hacia o desde tierra, pero su pendiente cambiará poco o nada."

3.2. SAVILLE (1950):

Escribió sobre perfiles de equilibrio en laboratorio, cuyo trabajo también recogió Bruun en 1954, indicando:

"In extending these experimental results to prototype conditions, it must be remembered that these results were obtained on so-called equilibrium beaches, beaches which were completely at equilibrium with the waves acting upon them. There was, therefore, no net transport of material perpendicular to the beach contour. Such a condition seldom if ever exists in nature."

Cuya traducción sería:

"Al extender los resultados experimentales a las condiciones de prototipo, se debe recordar que estos resultados fueron obtenidos en las llamadas playas en equilibrio, playas que estuvieron completamente en equilibrio con las olas actuando sobre ellas. No hubo, por tanto, transporte neto de material perpendicular a la orilla. Tales condiciones raras veces, si alguna vez, existen en la naturaleza."

3.3. BRUUN (1954):

El ingeniero danés definió perfil de equilibrio como:

"Laboratory experiments have shown the existence of 'equilibrium profiles', which, are defined in section 3.71 as profiles which maintain their form. Under actual conditions the equilibrium profile must be defined as a statistical average profile which maintain its form despite minor fluctuations in the time interval considered"

Cuya traducción sería:

"Experimentos de laboratorio han mostrado la existencia de un perfil de equilibrio, los cuales, son definidos en la sección 3.71 como perfiles que mantienen su forma. Bajo las condiciones actuales el perfil de equilibrio debe ser definido como un perfil promedio estadístico que mantiene su forma a pesar de las fluctuaciones menores en el intervalo de tiempo considerado".

3.4. VICENTE NEGRO (1989):

Aportó un nuevo concepto de éste al considerar el perfil de equilibrio de una playa. No consideró un perfil de equilibrio para unas determinadas características de oleaje y granulometría, sino que definió unas franjas de confianza o método de las envolventes de equilibrio de perfil esquemático ante diferentes condiciones de clima marítimo y de parámetros sedimentológicos, que disminuyen la incertidumbre que existe en la determinación de la situación de retroceso y pérdida transversal de la línea de orilla.

3.5. LARSON Y KRAUS (1989):

Escribieron en el informe del programa SBEACH, que recoge Pilkey et al (1993), estas consideraciones sobre el perfil de equilibrio de una playa:

"From a theoretical viewpoint, it is of minor importance if the equilibrium profile is never realized in the field due to variable waves and water level, and complex three dimensional hydrodynamic processes, as long as the concept is verified by (we assume wave tank) experiment"

Cuya traducción sería:

"Desde un punto de vista teórico, es de menor importancia si el perfil de equilibrio nunca se alcanza en el campo debido a las variaciones de los oleajes y niveles del mar, y a los complejos procesos hidrodinámicos tridimensionales, mientras el concepto sea verificado (suponemos tanques de oleaje) experimentalmente".

3.6. MEDINA, LOSADA Y DALRYMPLE (1990):

Definieron el perfil de equilibrio como:

"...perfil que se mantendría constante cuando una determinada zona de costa con unas características fijas (tamaño de arena, etc.) esté solicitada por una serie de fuerzas actuantes (olas, corrientes y mareas). Esto es, el perfil no varía en el tiempo si las fuerzas actuantes permanecen constantes".

Como los perfiles de playa presentan unas variaciones importantes en las fuerzas actuantes, el perfil de equilibrio puede ser entendido como un perfil medio estadístico en un plazo determinado de tiempo p. e. un año. Quiere esto decir que un método adecuado para el estudio de un perfil de playa sería la determinación del perfil medio y el examen de las desviaciones del mismo respecto a la media."

3.7. DEAN (1991 Y 2002):

Respecto al perfil de playas escribió, cuya traducción sería:

"El perfil de equilibrio es conceptualmente el resultado de un balance entre fuerzas destructivas y constructivas. En el laboratorio, es relativamente fácil alcanzar un perfil de equilibrio lanzando un tren de olas estable sobre la arena durante un largo tiempo. Después de la remodelación del perfil inicial, resulta un perfil "final" que cambia poco con el tiempo. Este es el perfil de equilibrio para estos materiales de playa y para aquellas condiciones de oleaje. En la naturaleza, el perfil de equilibrio se considera un concepto dinámico, por los cambios continuos del campo de olas incidente y del nivel del mar; por tanto, el perfil responde continuamente. Promediando estos perfiles en un período largo de tiempo, puede ser definido un equilibrio medio".

3.8. PILKEY ET AL (1993):

En las conclusiones de su artículo, respecto al perfil de equilibrio, se pregunta, traducido:

“(1) ¿Existe el perfil de equilibrio en la naturaleza? Sí, desde un punto de vista de gran escala hay pendientes locales que están probablemente en equilibrio con un gran número de factores oceanográficos y geográficos”.

3.9. INMAN, ELWANY Y JENKINS (1993):

Respecto al perfil de playas escribieron su definición de perfil de equilibrio, cuya traducción sería:

“Un perfil de equilibrio debe ser, por definición, un perfil a lo largo del cual el transporte de sedimentos transversal, local, promediado en el tiempo, es cero en todos los puntos, lo mismo que el transporte longitudinal. Sin embargo, las características de la fuerza del oleaje que gobierna el transporte de sedimentos y los cambios en el perfil, los tipos de transporte de sedimento (suspensión o arrastre), y los mecanismos de respuesta de la playa están lejos de ser comprendidos”.

3.10. GONZÁLEZ (1995):

En su tesis doctoral, indica respecto al perfil de equilibrio:

“...dado que las variaciones de los diferentes agentes (oleaje, etc.) están, en principio, acotadas, también lo estará la variabilidad del perfil pudiéndose admitir en la naturaleza la existencia de una situación modal o perfil de equilibrio que sufre variaciones en función del clima marítimo existente. Más aún, es posible reconocer períodos en los que las condiciones de oleaje pueden considerarse constantes (verano, invierno, un temporal). Bajo estas condiciones la playa puede desarrollar un perfil de equilibrio.”

3.11. BERNABEU (1999):

En su tesis doctoral, dijo:

“...la existencia de un perfil de equilibrio en la naturaleza es prácticamente imposible, debido a las variaciones constantes de los distintos agentes dinámicos. En sentido estricto, el perfil de equilibrio es un concepto teórico que únicamente será posible alcanzar en la en la laboratorio, donde las condiciones están controladas”.

Después la autora, refiriéndose a lo dicho por González (1995) respecto al perfil de equilibrio, continúa:

“...pudiéndose definir un estado modal o más frecuente, que consideraremos como el perfil de equilibrio de la playa. Este concepto podrá aplicarse a cualquier línea de costa para describir las características generales del perfil de playa real. Por tanto, definirá el equilibrio dinámico que existe cuando el perfil de playa varía continuamente en respuesta a las condiciones de la zona de rompientes.”

3.12. GÓMEZ PINA (2001):

En su tesis doctoral, definió el perfil de equilibrio como:

“Situación o estado al que llega un perfil de playa, en situación de oleaje constante, con tiempo suficiente.

En sentido estricto no existe la situación de perfil de equilibrio en la naturaleza. Existen sin embargo situaciones prolongadas en las que sí podemos suponer que existe la situación de equilibrio.”

4. CONCEPTO DE PERFIL ESTÁTICO Y PERFIL DINÁMICO DE UNA PLAYA

Si se hace una reconsideración crítica de todas las definiciones de perfil de equilibrio de playa que se han insertado en el apartado anterior se puede llegar a una serie de conclusiones interesantes para poder abordar cualquier estudio sobre perfiles, como el que se pretende en este trabajo.

Ninguno de los autores cree en la existencia de un perfil de equilibrio. Todos ellos, aunque con matices siguen la idea dada por Feneman (1902). Para resolver este problema existen dos vías elegidas por los autores: La primera es suponerse un perfil medio dentro de las oscilaciones medias anuales, como Bruun (1954), Medina et al (1990), y Dean (1991-2002); a este perfil medio se le da una banda de confianza introdu-



FIGURA 3. Estados naturales de una playa que indican el estado dinámico del perfil.

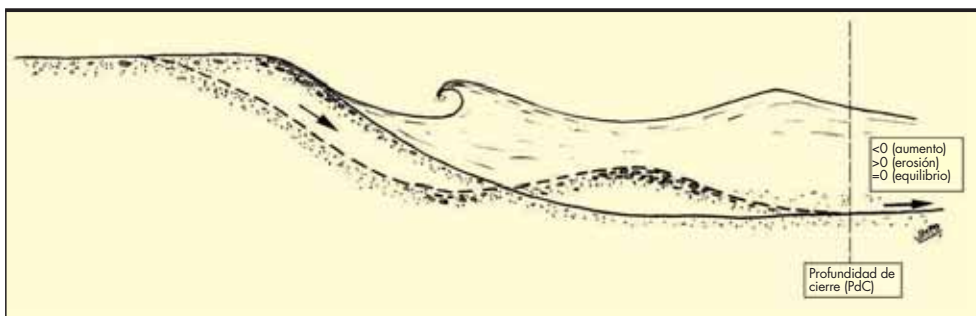


FIGURA 4. Estados extremos de un estado de equilibrio dinámico de un perfil.

cido este concepto por Vicente Negro (1989). La segunda vía es la que se introduce más tarde con González (1995), Bernabeu (1999) y Gómez Pina (2001), ellos aún negando la existencia estricta de un perfil de equilibrio, admiten que existen momentos, con determinadas condiciones de clima marítimo que puede considerarse como perfil de equilibrio.

El problema estriba, en que si no se cree en un perfil de equilibrio, huelga cualquier formulación exacta que lo quiera determinar. Pero, en todos los autores existe otro concepto de perfil latente, que solamente Dean lo indica expresamente, y es que no se puede entender el perfil de playa como un elemento estático sino dinámico; variando su forma en tanto varía las fuerzas climáticas marinas que inciden sobre él. Entonces cabría preguntarse por qué tanto esfuerzo por determinar una forma de perfil que no es precisa en sí. La respuesta la dan los propios autores en sus definiciones de perfil de equilibrio: porque puede existir un perfil que sea representativo de esa playa y que nos indique el comportamiento medio que esta puede tener con el clima marítimo existente en ella. El problema está en cuál es ese perfil representativo si el perfil medio que apunta Bruun (1954) asumiendo ligeras oscilaciones sobre él, o el perfil de un estado de cierta tranquilidad climática marina, o de bonanza, que es subjetivamente el que nos apunta los últimos estudios, y sobre el que la gran mayoría de autores trabajan.

Si se acepta que el perfil de playa es un elemento dinámico, como todos los autores admiten, éste tendrá infinitos estados por los que pasará a lo largo del tiempo; pero en ese estado dinámico existirá al menos un extremo, que es el que hasta ahora se ha usado: el estado de bonanza, o la incidencia del oleaje con una escasa energía, pudiendo definirse otro estado, también extremo, de máxima acción del oleaje sobre él, aunque entonces podría pensarse en el concepto de periodo de retorno. También podría pensarse en estado medio del perfil; pero éste si es anual dependerá, a su vez, del clima del oleaje en ese año.

Además, el conocimiento del perfil de playa con una acción determinada del oleaje debiera ser acompañado de un grado de incertidumbre que intrínsecamente tienen los datos que obtenemos, apuntado muy acertadamente en los últimos trabajos de Sánchez Arcilla et al (2009)

Por tanto debiera introducirse la idea de estados extremos de un perfil de playa, no como una línea sino como una banda de fluctuación de líneas de perfiles en los cuales solamente debe conocerse un perfil representativo y la banda u horquilla que lo acompaña, o bien los dos estados extremos de esa horquilla; el de bonaza probablemente como perfil representativo del comportamiento de la playa y el de máxima acción en un periodo de tiempo determinado como estado del perfil que delinea los límites superior e inferior de la dinámica propia del perfil. Pero ambos deben definirse bien para no dar lugar a equívocos a la hora de su análisis en la naturaleza.

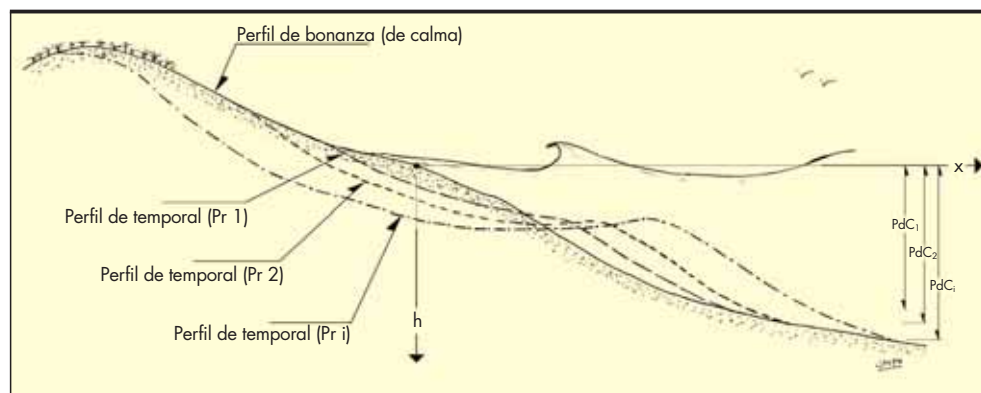
Si solamente se considera el estado dinámico del perfil, este estará en equilibrio cuando el balance sedimentario de él sea nulo como vienen a indicar Inman et al (1993).

5. ESTADOS EXTREMOS DEL PERFIL Y GRADO DE INCERTIDUMBRE

Con las premisas de los apartados anteriores, debiera indicarse que no existe un estado de equilibrio de una playa en su sentido estricto, o más bien como idea estática de éste. Debiendo recurrirse al concepto dinámico; fluctuando en una franja y sin pérdida de material, debiendo siempre ir con el “apellido” de periodo de retorno, si bien esto da problemas como más tarde se indicará. Con ello se podría definir el perfil de una playa, teóricamente, mediante sus dos estados extremos:

- En perfecta calma.
- En máxima agitación para un periodo de tiempo determinado, periodo de retorno.

FIGURA 5. Estados extremos de un perfil de playa con diferentes periodos de retorno.



Aún definiendo ambos estados, nos encontraríamos con un grado de incertidumbre que se tiene al adquirir y tratar los datos que nos dan y define ambos estados tal y como Sánchez Arcilla et al (2009) han estudiado, obteniéndose una banda de incertidumbre muy alta cuando se trata de definir el periodo de retorno.

El primero de los estados, en perfecta calma, es el más fácil de definir, y probablemente el que debiera tomarse para comparar los diferentes estados del perfil de una playa determinada, e implícitamente parece que es el al que los diferentes autores se refieren al estudiar el "perfil de equilibrio". Éste se puede hallar cuando ha pasado un largo periodo de bonanza que ha permitido al mar restablecer ese estado más favorable, cuyo periodo podría oscilar entre 1 y 3 meses, dependiendo si en aquel periodo de tiempo la calma es total o han habido oleajes de baja intensidad, no temporales, entendiéndose por temporales aquellos oleajes con $H_{1/3} > 1,5$ m, aunque Sánchez Arcilla et al (2009) consideran la existencia de temporal para alturas de ola significantes mayores de 2 m. Pero también, puede suponerse aptos para la comparación en perfiles de bonanza las zonas abrigadas, con baja probabilidad de incidir oleajes de las características apuntadas anteriormente.

6. COMPORTAMIENTO DEL PERFIL DINÁMICO Y VARIABLES REPRESENTATIVAS

Antes de exponer los resultados del análisis de los grupos de perfiles que se pudo utilizar para el trabajo, es conveniente explicar el modelo y la metodología seguida para estudiar el perfil dinámico, esto es; estudiando en grupo cómo se comporta el perfil de una playa determinada. Para ello lo primero que se tiene que considerar son las envolventes del perfil a lo largo de un tiempo t , que será el que se considere, en una primera aproximación como periodo de retorno.

La primera de las hipótesis de partida es tomar el perfil medio, como perfil representativo que divide a ese volumen V entre envolventes en dos volúmenes iguales: del perfil medio hasta la envolvente inferior, V_i , y del perfil medio hasta la envolvente superior, V_e : esto es:

$$V_i = V_e$$

Pero esta igualdad, si no existen pérdidas en el perfil por transporte sólido litoral longitudinal o/y transversal, se man-

tiene en todo momento, esto es; en un instante determinado, el perfil de la playa tendrá una forma determinada que se mantendrá dentro de ese volumen envolvente y que lo dividirá en dos, V'_i y V'_e , de tal forma que se cumpla:

$$V_i = V_e = V'_i = V'_e$$

Por lo tanto, para caracterizar un perfil determinado de una playa en su estado dinámico hay que conocer las envolventes, o el perfil medio, la anchura A del desplazamiento entre envolventes y las profundidades de cierre activa y máxima.

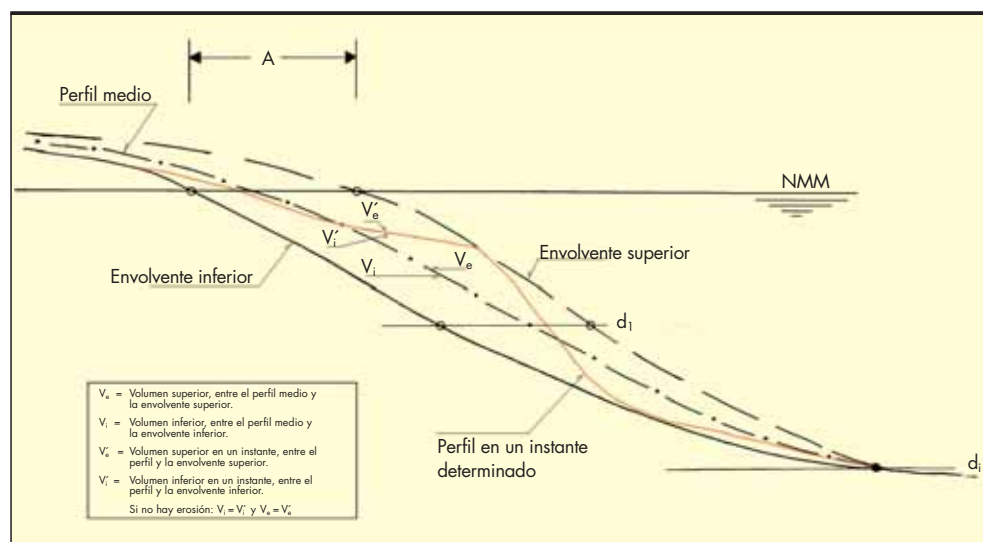
El problema estriba que solamente sabremos ese comportamiento para un periodo de retorno determinado que nos lo fija, en un principio, el número de años que se ha ido observando el perfil en cuestión, aunque también depende de los temporales ocurridos en un periodo corto de tiempo antes de tomar la medida. Además, dado que para caracterizar un perfil nos hacen falta un buen número de observaciones de éste, solamente se puede tomar datos en aquellas playas que cumpla que existe gran número de observaciones de un perfil; pero esto no suele ser lo corriente, como se podrá observar en los apartados siguientes.

Las variables que se han considerado para analizar y caracterizar los perfiles dinámicos de playa son las siguientes, en orden de su estudio y análisis:

1. Estudio conjunto de todos los estados de un perfil que se tengan en las diferentes campañas.
2. Determinación de la envolvente de ese grupo de perfiles.
3. Cálculo del perfil medio; determinado a partir de la envolvente, superior e inferior o del grupo de perfiles.
4. Cálculo de la curva teórica que se adapta al perfil medio; parábola, bi-parábola o curva exponencial.
5. Determinación de las profundidades de cierre activa y máxima para el intervalo de años en que se realizaron las campañas.
6. Distancia máxima y mínima horizontal de la zona activa del perfil que ha fluctuado.

Además, se deben estudiar para cada playa, si las condiciones lo permiten, al menos dos perfiles, con el objeto de comprobar que el comportamiento de ambos es similar.

FIGURA 6. Hipótesis del comportamiento dinámico de un perfil.



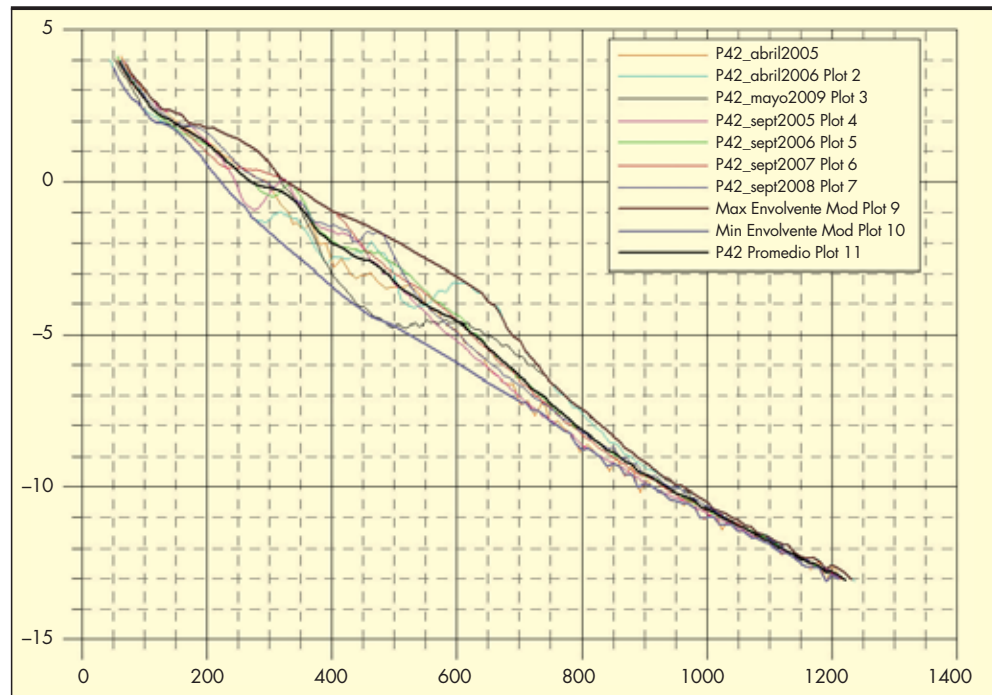


FIGURA 7. Ejemplo del análisis dinámico del perfil; perfil 10 de la Playa de Salinas, Castrillón (Asturias).

7. ANÁLISIS DE ADAPTACIÓN DE PERFILES

En el estudio realizado en el CEDEX para la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar, se analizaron in total de cinco playas con dos perfiles por playa, y se aplicó para su análisis las cinco variables que se indican en el apartado anterior, con los resultados que se muestran a continuación.

En la tabla 1 se resumen los resultados de las variables que determinan la superficie en la cual se mueve el perfil para adaptarse a la acción del oleaje en cada momento de los análisis de los grupos de perfiles para cada playa. En ella hay datos que no se aprecian en el análisis por lo que se indican como indeterminados, “indet.” en la tabla. Resulta interesante, como análisis de la muestra, el número de datos y

Playa y perfil	$H_{0'137}$ (m)	Variación máxima (m)		PdC activa (dl) (m)		PdC máxima (di) (m)		T toma de datos	
		A	d_A	Medida	Teórica	Medida	Teórica	Total (años / campaña)	Sesgo
Salinas 30	5,3	200	-1/-4,2	4,5	9,27	13	18,55	4 / 7	centro
Salinas 42	5,3	200	-2,3/4,5	4,5	9,27	13	18,55	4 / 7	centro
Peñíscola 2	2,6	75	-2,2/-3,2	3,2	4,55	4	9,10	3 / 4	verano
Peñíscola 5	2,6	28	-1,3/-1,7	Indet.	4,55	5	9,10	3 / 4	verano
Malagueta10I	3	17	-1,3/-1,7	2,7	5,25	4,25	10,50	2,3 / 3	Poco V
Malagueta10II	3	55	-2/-2,4	2,4	5,25	5	10,50	1,6 / 4	Poco In
Malagueta31I	3	30	-0,8/-1,5	1,5	5,25	4	10,50	2,3 / 3	Poco V
Malagueta31II	3	40	-1,5	3	5,25	5,6	10,50	1,6 / 4	Poco In
S. Andrés 16	3	50	-3,2/-4	4,2	5,25	6	10,50	4,5 / 3	Poco In
S. Andrés 31	3	25	-3,8	4	5,25	5,5	10,50	4,5 / 3	Poco In
Campello 10	2,8	15	-0,3 /-1	Indet.	4,9	4	9,8	1 / 2	Verano
Campello 4	2,8	22	-1	Indet.	4,9	4	9,8	1 / 2	Verano

TABLA 1. Comparativa de variables superficiales de perfiles.

cuándo fueron tomados; resumiéndose en la tabla en las dos últimas columnas: "T toma de datos", donde se ha separado el número de años que se estuvieron tomando y el número de datos, campañas, que se realizaron; y el sesgo indica si las campañas que se realizaron son representativas del año, tanto de invierno como de verano, en cuyo caso se pone "centro" mientras que si solamente representan un periodo del año se pone "verano" o "invierno", o cuando hay más de un periodo que otro, entonces se precede con "Poco..."

Como puede apreciarse en la tabla en la mayoría de las playas existen muy pocos datos, y solamente en la playa de Salinas el paquete de perfiles está centrado y el número de datos es suficientemente correcto como para ser representativo el resultado, mientras que el resto los datos son escasos y se encuentran sesgados respecto al periodo del año, por lo que solamente se pueden considerar como aproximados o tendencias del comportamiento de las playas, no pudiendo hacer un análisis dinámico correcto del perfil de la playa en cuestión.

Las profundidades de cierre activas y máximas son mucho mayores las teóricas que las obtenidas con los datos; seguramente, debido a ese sesgo y falta de datos que se ha indicado en el párrafo anterior. Mostrando claramente que, cuando se quiere caracterizar una playa y analizar su comportamiento, las campañas que se realicen deben ser tendientes a ser representativas del movimiento del perfil a lo largo del año, con al menos dos campañas en periodo estival e invernal y, además, la extensión en el tiempo ha de ser al menos de 4 o 5 años. Con estas premisas, puede indicarse que los datos que se han manejado no son suficientes como para conocer el comportamiento esperable de los perfiles de playa en las costas españolas, y solamente se puede indicar aproximaciones o tendencias del comportamiento de las playas en cuestión.

En la tabla se observa, además, que la variación máxima del perfil se da en un intervalo de profundidades grande cuanto más campañas se hayan realizado y mejor distribuidas estén en el año.

En las siguientes tablas se muestran los resultados comparativos de los ajustes teóricos de todos los perfiles analizados, en los cuales se ha incluido una última columna que se ha denominado "Adaptación", en ella se han valorado tres factores: 1) Coeficiente de regresión, 2) La suma residual de los cuadrados, y 3) Apreciación subjetiva de la representatividad de la curva teórica con la real.

Dando la siguiente valoración: E, excelente, cuando se adapta perfectamente la curva teórica con un coeficiente de correlación muy alto y muy baja la suma residual de los cuadrados. Pasando por los escalones de MB, muy buena; B, buena; R, regular; M, mala; MM, muy mala; y P, pésima cuando ni se parecen las curvas, el coeficiente de correlación es muy bajo y la suma residual de los cuadrados es altísima.

El perfil parabólico ensayado viene determinado por la ecuación genérica de la parábola:

$$Y = -A \cdot X^B + C$$

Siendo C la traslación horizontal de la parábola respecto a la línea de orilla, que solamente se ha considerado cuando existe una fluctuación importante en la línea de orilla como es el caso cuando existe marea, solamente considerado en la playa de Salinas, siendo para el resto cero.

Como se puede apreciar todas las playas tiene una adaptación aceptable a una parábola. Solamente en el caso de un perfil de la playa de la Malagueta, perfil 10, la adaptación es mala, debido a que existe un escalón muy profundo que no reproduce el perfil teórico. En cualquiera de las maneras, no existe ninguna uniformidad entre los exponentes, B, de las parábolas; en ocasiones hasta en la misma playa, y lo mismo

Playa y perfil	A	B	Adaptación
Salinas 30	0,0202	0,9525	M B
Salinas 42	0,035	0,883	M B
Peñíscola 2	0,123	0,638	M B
Peñíscola 5	0,4050	0,454	M B
Malagueta 10I	0,025	1,139	M
Malagueta 10II	0,007	1,352	M
Malagueta 31I	0,066	0,902	B / R
Malagueta 31II	0,048	0,949	B / R
S. Andrés 16	0,099	0,723	B
S. Andrés 31	0,138	0,684	B
Campello 10	0,163	0,626	B
Campello 4	0,205	0,579	B

TABLA 2. Perfil parabólico ($Y = -A X^B$).

se puede decir del coeficiente A. Por lo que sería absurdo intentar una adaptación única que englobase todos los casos, que, además, se ha indicado, no es buena representación de los diversos estados que puede encontrarse el perfil de una playa a lo largo del tiempo, sino solamente una aproximación.

Los resultados de la adaptación de una curva exponencial son similares a los obtenidos en el caso de la parábola y con similares considerandos.

El perfil exponencial ensayado viene determinado por la ecuación genérica de la parábola:

$$Y = -G(1 - e^{JX}) + C$$

Siendo C la traslación horizontal de la curva respecto a la línea de orilla.

Los datos que se obtienen en la adaptación de la pendiente de la playa no corresponden en todos los casos a la pendiente real de ésta, teniendo en cuenta que la pendiente de la playa tomada es la media desde la línea de orilla hasta la profundidad de 10 m, lo que indica una pendiente media y esta es la que se adapta bastante bien en la mayoría de los casos. No obstante, la adaptación observada no es excesivamente mala, salvo en el caso de las playas de Peñíscola y Campello, donde se acababa de regenerar la playa y probablemente no se había producido la redistribución natural del sedimento.

Cuando se ha forzado a una adaptación teórica del perfil al tipo de Dean, se observa que ésta, como es lógico, es algo peor que las adaptaciones teóricas anteriores; pero no son excesivamente malas: solamente en el caso del perfil 10 de la playa de la Malagueta, con un escalón importante, la adaptación es muy mala, y el resto de los perfiles de esta playa, es mala y en Peñíscola, el perfil 5 también. La comparación del tamaño medio del sedimento real y el que da la adaptación al perfil de Dean, proporcionó resultados, en aquellas playas donde se tenían datos, que no se alejaban mucho unos de otros; por lo que, en una primera aproximación resultan aceptables estos ajustes del coeficiente de Dean.

El perfil parabólico ensayado viene determinado por la ecuación genérica de la parábola:

$$Y = -A \cdot X^{0,667} + C$$

Playa y perfil	G	J	m real (0 a 10m)	m teorico			Adaptación
				m ₀	m ₁₀	m _{medio}	
Salinas 30	106,98	0,000146	0,0114	0,0157	0,0136	0,0146	M B
Salinas 42	78,21	0,000214	0,0114	0,0167	0,0142	0,0155	M B
Peñíscola 2	11,06	0,0019	0,0116	0,0210	0,00061	0,0108	B
Peñíscola 5	8,81	0,0034	0,0105	0,03	0,0012	0,0156	M
Malagueta 10I	999,99	0,00005	0,052	0,050	0,049	0,050	M
Malagueta 10II	1000	0,00004	0,047	0,040	0,040	0,040	M
Malagueta 31I	31,29	0,00147	0,038	0,046	0,031	0,038	B / R
Malagueta 31II	57,91	0,00067	0,0373	0,0388	0,0322	0,0355	B / R
S. Andrés 16	15,39	0,00173	0,018	0,027	0,0102	0,0186	R
S. Andrés 31	14,03	0,0023	0,020	0,0322	0,0102	0,0212	R
Campello 10	11,16	0,0026	0,015	0,029	0,0053	0,017	B
Campello 4	10,10	0,00285	0,0137	0,029	0,0036	0,016	R

TABLA 3. Perfil exponencial $Y = -G(1 - e^{JX})$.

Siendo C la traslación horizontal de la parábola respecto a la línea de orilla que solamente se ha considerado cuando existe una fluctuación importante en el línea de orilla como es el caso cuando existe marea, solamente considerado en la playa de Salinas. Y siendo para el resto cero y A el coeficiente de Dean.

Playa y perfil	A	D50 Dean (mm)	D50 real (mm)	Adaptación
Salinas 30	0,174	0,61	0,33*	R
Salinas 42	0,173	0,61	0,35*	R
Peñíscola 2	0,10	0,20	2,96	M B
Peñíscola 5	0,103	0,21	1,68	M
Malagueta 10I	0,254	FR	2,56	M M
Malagueta 10II	0,224	FR	1,29	M
Malagueta 31I	0,227	FR	1,17	M
Malagueta 31II	0,213	1,04	1,45	M
S. Andrés 16	0,139	0,37	0,5-1	B
S. Andrés 31	0,153	0,45	0,5-1	B
Campello 10	0,127	0,31	0,32	B
Campello 4	0,119	0,27	0,32	R

TABLA 4. Ejemplo del Perfil parabólico de Dean ($Y = -AX^{2/3}$).
(* Tomadas en la campaña de 2001).

8. CONCLUSIONES

Las conclusiones son de dos tipos diferentes, dependiendo de: si se quiere trabajar o analizar perfiles de playa; o se necesita tener un perfil teórico para usar en proyectos de actuaciones en playas. Las conclusiones para cada uno de ellos son las siguientes.

8.1. DEL ANÁLISIS DEL PERFIL DE PLAYA:

1. El perfil de equilibrio en completa calma, propuesto inicialmente, para un análisis estático de perfil es prácticamente imposible de conseguir en playas abiertas, por lo que se debe optar por analizar dinámicamente el perfil; esto es, considerando todos los estados y formas que va adquiriendo el perfil a lo largo del tiempo.
2. Para estudiar y analizar el comportamiento de un perfil de playa no es válido caracterizarlo en un instante determinado ya que éste solamente representa la playa en el instante que se ha tomado y no el comportamiento general.
3. Para que sea válido el análisis dinámico debe tener un mínimo de datos, pudiéndose aceptar éstos cuando: las campañas que se realicen deben ser tendentes a ser representativas del movimiento del perfil a lo largo del año, con al menos dos campañas en periodo estival e invernal y, además, la extensión en el tiempo ha de ser al menos de 4 o 5 años.
4. El perfil dinámico viene representado por las siguientes variables:
 - I. Estudio conjunto de todos los estados de un perfil que se tengan en las diferentes campañas.
 - II. Determinación de la envolvente de ese grupo de perfiles.

- III. Cálculo del perfil medio; determinado a partir de la envolvente, superior e inferior o del grupo de perfiles.
- IV. Cálculo de la curva teórica que se adapta al perfil medio; parábola, bi-parábola o curva exponencial.
- V. Determinación de las profundidades de cierre activa y máxima para el intervalo de años en que se realizaron las campañas, real y teórico.
- VI. Distancia máxima y mínima horizontal de fluctuación de la zona activa del perfil.

8.2. DEL USO DEL PERFIL DE PLAYA TEÓRICO:

Si se extrapolan los resultados a una concepción general del comportamiento esperable de los perfiles de playa a lo largo de las costas peninsulares españolas se puede indicar, en líneas generales:

5. El perfil medio dinámico se adapta, en una primera aproximación, a una curva tipo parabólica o exponencial. Pudiéndose utilizar los criterios de Komar y McDougal, y Dean en esa aproximación. Teniendo en cuenta que la pendiente real de la playa correspondería con la pendiente media de la curva exponencial de Komar y McDougal no con la de la línea de orilla, esto es: $m_{\text{real}} [0-10m] = 1/2 (m_0 + m_{10})_{\text{teórico}}$.
6. La fluctuación del perfil, o variación máxima A, si se toman los valores extremos, para caer del lado de la seguridad, de los datos obtenidos, debe suponerse una banda de fluctuación 38 veces la $H_{0.137}$ para el norte de España y de 30 veces para el Mediterráneo. Dándose esta variación horizontal máxima entre la línea de orilla y la profundidad de cierre activa.
7. La profundidad de cierre activa debe calcularse según el criterio de Hallermeier.
8. La profundidad de cierre máxima debe tomarse entre 2 y 1,5 veces la profundidad de cierre activa; siendo el primer valor más apto para la costa atlántica y el segundo para la mediterránea. Si bien se puede usar el primer valor para caer del lado de la seguridad.
9. Dado que todas las afirmaciones anteriores están basadas en escasos datos, éstas deben tomarse como aproximadas, no pudiendo darlas como certeza absoluta ya que para ello se necesitarían muchos más datos de los que se ha dispuesto.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bernabeu, A. M. (1999). *Desarrollo, validación y aplicaciones de un modelo general de perfil de equilibrio de playas*; Universidad de Cantabria. Tesis Doctoral.

Bruun, P. (1954). *Coast erosion and the development of beach profiles*; U.S. Army, Corps of Engineers (Memoria Técnica nº 44).

Dean, R. G. (1991). *Equilibrium Beach Profiles: Characteristics and Applications*; Journal Coastal Research, Vol. 7 nº 1 (pp 53-84).

Dean, R. G. y R. A. Dalrymple (2001). *Coastal Processes with Engineering Applications*; Cambridge University Press.

Fenneman, M. M. (1902). *Development of the profile of equilibrium of the subaqueous shore terrace*; Journal of Geology. Vol. X. (pp. 1 a 32).

Gómez Pina, Gregorio (2001). *Modelo biparabólico de cuantificación de perfiles en mares con marea basado en datos de campo del litoral español*; Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. Tesis Doctoral.

González, M. (1995). *Morfología de playas en equilibrio. Planta y perfil*; Universidad de Cantabria, Tesis Doctoral.

Inman, D. L., M. H. S. Elwany y S. A. Jenkins. (1993). *Shore-rise and Bar-Berm profiles on ocean beaches*; Journal of Geophysical Research. Vol. 98. NO. C10. (pp.18181 a 18.199).

Larson, M y N. C. Kraus, (1989). *SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change*; Tech. Report CERC-89-9. U.S. Army Corps of Engineers Coastal Engineering.

Medina, R., M. A. Losada y R. A. Dalrymple (1990). *Análisis de perfiles de playa por medio de funciones ortogonales empíricas (método FOE)*; Revista de Obras Públicas. Junio. (pp. 9 a 17).

Negro, V. (1989). *Isolíneas de realimentación y rellenado en playas sin marea. Método de las envolventes para equilibrio morfodinámico en perfil transversal*; Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. Tesis Doctoral.

Peña Olivas, José Manuel de la (dirección) y Miguel Ángel Otero Barreiro (1990). *Estudio Sistemático de Perfiles de Playa*; Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (informe técnico nº 22-417-9-087, para la Dirección General de Puertos y Costas.

Peña Olivas, José Manuel (2007). *Guía técnica de estudios litorales. Manual de costas*; Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (colección señor nº 39).

Pilkey, O. H., R.S Young, S.R. Riggs, A.W Sam Smith, H. Wu y W. D. Pilkey(1993). *The concept of shoreface profile of equilibrium: A critical review*; Journal of Coastal Research. Vol. 9, nº 1 (pp. 255 a 278).

Saville, T. Jr. (1950). *Model study of sand transport along an infinitely long, straight beach*; Trans. Amer. Geophys. Union. Vol. 31. nº 4.