

Las pendientes de la playa y el tamaño de la arena (2)^(*)

Por CARLOS GARAU SAGRISTA

El tamaño de la arena de las playas y la pendiente de éstas se encuentran ligados por relaciones que en el artículo se analizan y que permiten la posibilidad de establecer el tamaño de la masa sedimentaria con bastante aproximación.

1. PRESENTACION

Mi primer artículo sobre las relaciones que ligan las diferentes pendientes del perfil y el tamaño de la masa sedimentaria de una playa significan, creo, un importante avance en el conocimiento de los mecanismos que gobiernan el equilibrio frontal de las playas. A nivel internacional es éste un tema que preocupa y, en el mismo año 1984, en Holanda, tenía lugar una discusión sobre las investigaciones de P. Vellinga (1982) y este investigador proponía una ecuación general del perfil. Ello me brinda una ocasión para contrastar mis teorías y, tal como se muestra en el presente artículo, para comprobar cómo los resultados de P. Vellinga (1982) confirman mis planteamientos, mientras que los intentos de generalización de P. Vellinga (1984) caen en una importante desviación.

2. CONFIRMACION DE LAS ECUACIONES FUNDAMENTALES (P. Vellinga 1982)

Cuando en los años 1983-1984 escribía mi artículo sobre la relación que liga el tamaño del sedimento con el perfil, (R. de O.P. diciembre 1984), desconocía las conclusiones de P. Vellinga (1982). Aunque el título de su artículo «Erosión de dunas y playas durante los temporales con fuerte entumecimiento» (Storm Surges) y su especial dedicación a la problemática de los ensayos en modelo reducido, no parece que vaya a tener especial referencia al tema pendiente-tamaño, puede decirse que la principal conclusión del trabajo de P. Vellinga se resume así:

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de noviembre de 1986.

«La relación entre la pendiente del perfil de erosión y la velocidad de caída del material del lecho se puede describir por la relación:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\operatorname{tg} \alpha_{\text{ref}}}{(w_{\text{ref}})^{0.56}} \cdot (w)^{0.56} \quad [28]$$

siendo $\operatorname{tg} \alpha$, $\operatorname{tg} \alpha_{\text{ref}}$ la pendiente de playas sujetas a idénticas condiciones de oleajes, constituidas por arenas que tienen las velocidades de caída W y W_{ref} , respectivamente».

El significado de $\operatorname{tg} \alpha = \frac{d}{l}$, queda aclarado en la figura 8, y en la figura 9 P. Vellinga representa los resultados de su análisis para dos valores de la profundidad «d» ($d = 1,5 \text{ m.}$ y $d = 4,5 \text{ m.}$).

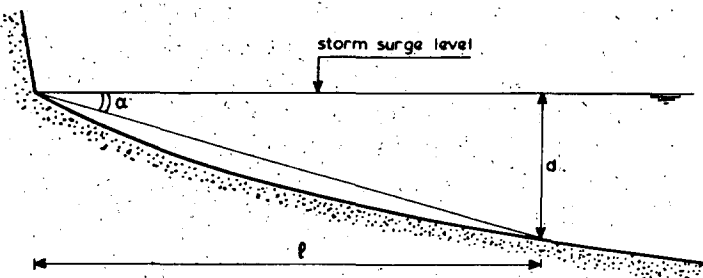
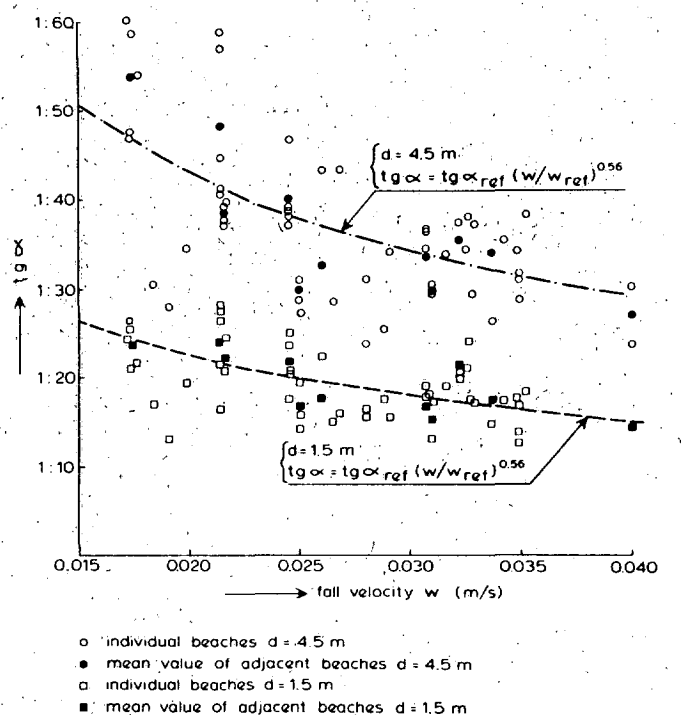


Figura 8. — Definición de $\operatorname{tg} \alpha$ (Fig. 23 de P. Vellinga, 1982).

Si bien existen algunas diferencias cualitativas entre la expresión propuesta en C. Garau 1984, y la de P. Vellinga 1982, que más adelante aclararemos, la ecuación [28] representa una condición general que deben cumplir las ecuaciones [1] [2] [4] [7] [10] [14] y sus homónimas [26], [27], puesto que las pendientes m_s , m_o y

Nota: La numeración de fórmulas y figuras es continuación del primer artículo sobre el tema. C. Garau, R. de O. P. - diciembre 1984 - P. 943 a 960.



Fall velocity and beach profile slope after a storm surge.

Figura 9. — Reproducción de la figura 24 de P. Vellinga (1982)

$tg \delta$, (C. Garau 1984) corresponden, dentro de cierto margen de aproximación, a casos particulares de $tg \alpha$ (P. Vellinga 1982) para ciertas profundidades ($d = h_m$, $d = h_o$, $d > o$, respectivamente). Y en efecto, vamos a comprobar que la cumplen y que se ajustan a los valores de la Figura 9 con un grado de aproximación excelente, con la diferencia de aplicar el exponente 0,5, en lugar de 0,56, a la velocidad de caída de las partículas. En primer lugar, observamos la similitud de la ecuación [10] (pág. 950).

$$tg \alpha = 0,324 \cdot \sqrt{w} \quad [29] \equiv [10]$$

donde w viene expresado en m/seg.

En la Figura 9, de P. Vellinga (1982) se ha observado que las curvas dibujadas para $d = 1,5$ m. y $d = 4,5$ m. (curva de trazos y de raya y punto, respectivamente) corresponden a las ecuaciones:

$$(tg \alpha)_{1,5} = 0,3973 \cdot w^{0,56} \quad [30]$$

$$(tg \alpha)_{4,5} = 0,2068 \cdot w^{0,56} \quad [31]$$

En base a los mismos valores de ambas curvas, se han ajustado otras con exponente 0,5, las cuales se representan en trazo continuo sobre la figura 10, según las ecuaciones:

$$m_{1,5} = 0,3193 \cdot w^{0,5} \quad [32]$$

$$m_{4,5} = 0,1662 \cdot w^{0,5} \quad [33]$$

pudiéndose comparar con los datos de las diferentes playas o ensayos aportados por P. Vellinga. Todo ello suscita los siguientes comentarios:

(1) La nube de puntos que conduce a la determinación del exponente 0,56, aplicado a la velocidad de caída, se ajusta igualmente a una curva con exponente 0,5.

(2) Tomando la expresión general.

$$tg \alpha = K \cdot \sqrt{w} \cdot \varphi(H, T) \quad [34]$$

en la cual el factor K depende de la profundidad « d » tenemos los siguientes valores de K :

$tg \delta' \rightarrow K = 1,73/\sqrt{T_o}$ Según la ecuación [14] ($d = 0$) C. Garau y R. Gourlay (1980).

$tg \delta' \rightarrow K =$ no cumple [28] Según la ecuación [5] ($d = 0$) y [15]. C. Garau (1984).

$tg \delta \rightarrow K = 0,324$ Según la ecuación [10] ($d > 0$) C. Garau.

$k = 0,3193$ Para ($d = 1,5$). Según P. Vellinga.

$m_o \rightarrow K = 0,19 \cdot K_a^{-1,22}$ Según las ecuaciones [2] y [27] C. Garau ($d \approx h_o$).

$K = 0,1662$ Para ($d = 4,5$) según P. Vellinga.

$m_s \rightarrow K = 0,059 \cdot K_a^{-1,11}$ Según las ecuaciones [1] y [26] C. Garau. ($d \approx h_m$)

El ajuste cuantitativo de estos coeficientes obtenidos por caminos muy diferentes, es muy bueno si tenemos en cuenta que:

a) $tg \delta$ corresponde a la playa emergida. Puede considerarse que debe dar pendientes del mismo orden que los obtenidos por P. Vellinga para $d = 1,5$ m. (Tener en cuenta que « d » se refiere al nivel entumecido).

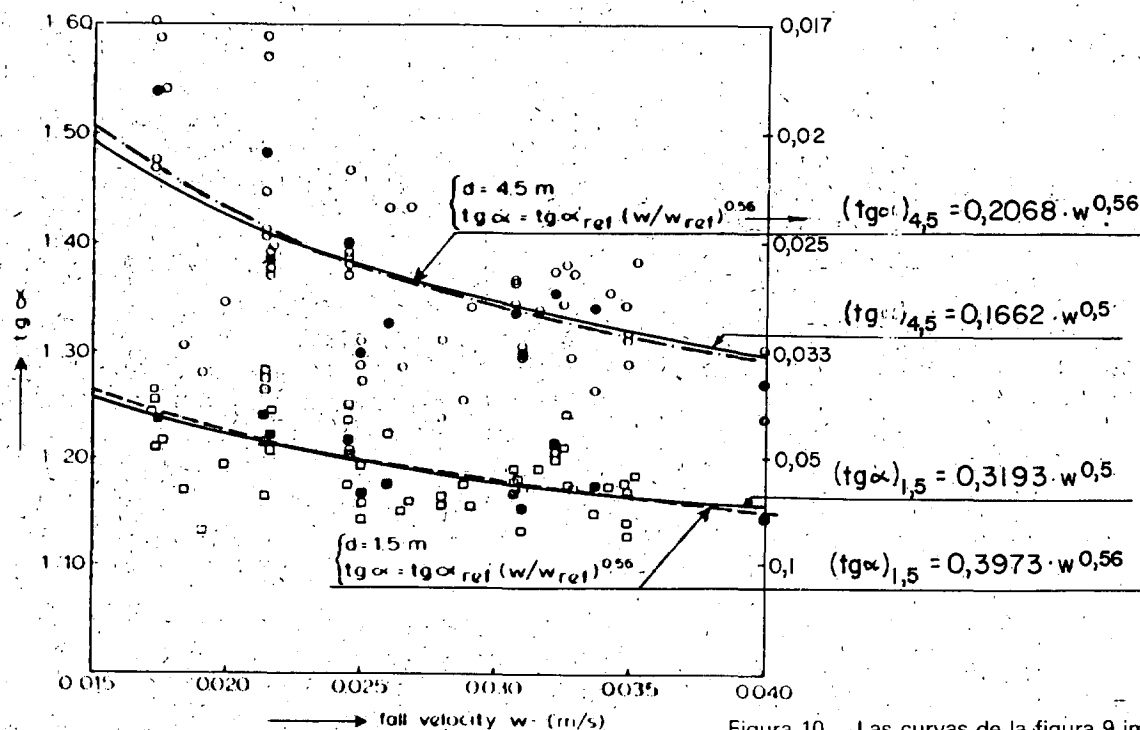


Figura 10. — Las curvas de la figura 9 implican un valor definido de $tg \alpha_{ref}/w_{ref}^{0.56}$, que es de 0,3973 para $d = 1,5$ m. y de 0,2068 para $d = 4,5$ m. El trazo continuo se superponen las curvas equivalentes para $w^{0.5}$.

b) m_0 corresponde a $d = h_0$, que varía desde valores inferiores a 1,3 m. (para $D_{50} = 0,20$ mm., $T = 10$ seg., $H = 4$ m. por ejemplo) hasta valores del orden de 4,5 m. (para $D_{50} = 1,4$ mm., $T = 12$ seg., $H = 5$ m.) o muy superiores en playas de guijarros. Por consiguiente, es lógico que el valor de K obtenido para m_0 sea algo superior al obtenido por P. Vellinga para $d = 4,5$ m.

c) m_s corresponde a profundidades $d = h_m$, que varía desde valores inferiores a 9 m. (para $D_{50} = 1,5$ mm., $T = 12$ seg., $H = 5$ m., por ejemplo) hasta valores normales de unos 14 metros (para $D_{50} = 0,2$ mm., $T = 12$ seg., $H = 5,7$ m., por ejemplo) y supera incluso los 25 m. (para $D_{50} = 0,18$ mm., $T = 18$ seg., $H = 9$ m.). Es por tanto lógico que el valor de K obtenido para m_s sea muy inferior al obtenido por P. Vellinga para $d = 4,5$ m.

d) Si examinamos las pendientes del perfil activo de la playa (C. Garau 1984) vemos que la única ecuación que no se ajusta a la expresión [28], es la [5] y la [15]. (No consideramos la ecuación [3] porque la pendiente m_p que representa está fuera del perfil activo). Ocurre que

estas ecuaciones corresponden, en determinadas condiciones, a $tg \delta'$ que es la pendiente del talud de flujo y reflujo, característica del perfil instantáneo pero irrelevante en el perfil medio. Recordemos una vez más:

$tg \delta'$
1) Conceptual y físicamente importante en el perfil instantáneo, en el cual la ecuación [5], juega un papel fundamental como mecanismo regulador de la condición [13] ($Hr \leq W$. T. 0,916).
2) Irrelevante en el perfil medio. En éste la pendiente $tg \delta$ es una forma residual, de una $tg \delta'$ producida por los grandes temporales y remodelada al amainar éstos.
3) Según cada situación concreta, $tg \delta'$ está gobernada por la ecuación [5] y al alcanzar el equilibrio estricto por ambas [5] y [14], y excepcionalmente por la [15].

Generalmente en los estudios del perfil se adopta el enfoque contrario: 1) Cuando se trata de interpretar el perfil de equilibrio instantáneo, no se presta suficiente atención al fenómeno de la reflexión de la ola sobre la playa, ni al mecanismo regulador de la altura de ola residual, cuyo máximo viene determinado por el período del oleaje y por la velocidad de caída del sedimento; 2) Cuando se intenta describir el perfil de la playa, se presta demasiada atención a la singularidad derivada de aquel mecanismo.

El hecho de que $tg \delta'$ esté gobernada por la ecuación [5] y tienda hacia la [14] según la limitación dada por [13] y excepcionalmente a la [15], es la característica fundamental del mecanismo regulador del perfil de equilibrio ante un temporal que actuase indefinidamente, sin alterar sus características (H_o , T_o) (ver C. Garau 1974 y C. Garay 1984, epígrafe 2,5). Las ecuaciones [5] y [13] regulan el proceso de acesión o de erosión frontal durante la evolución del perfil hacia el equilibrio, que se alcanza cuando la altura de ola residual llega al valor $H_r = 0,916 \cdot w \cdot T_o$ creciendo o decreciendo, respectivamente. En la situación de equilibrio se cumplen a la vez las ecuaciones [5] y [14] y por tanto también la [5] llega a ajustarse a la [28].

Nótese que en la ecuación [5] un aumento de altura se traduce en un incremento de la pendiente $tg \delta'$, efecto contrario al que experimentará el conjunto del perfil activo de la playa. Ello, según veremos más adelante, explica la contradicción en que incurre el intento de generalización de la ecuación del perfil de P. Vellinga (1984).

3) A pesar del buen acuerdo de los resultados, que se deduce del análisis anterior, hay una diferencia cualitativa sustancial entre ambos enfoques. P. Vellinga presupone un perfil parabólico que mantiene una forma geométrica semejante, sólo deformada por la escala horizontal (con factor variable según el tamaño del sedimento), puesto que la profundidad d es fija en cada una de las curvas de la figura 9. Por el contrario, C. Garau describe un perfil sensiblemente rectilíneo, con una notable singularidad en la orilla, cuya importancia varía cuantitativamente con el tamaño del sedimento. El perfil rectilíneo viene definido por m_s , mientras que

las singularidades corresponden a $tg \delta$, $tg \delta'$ y m_o , que a su vez depende de h_o (cota de la berma de la playa). Y esta singularidad puede llegar a ser tan importante como para que, en valor absoluto, sea $h_o > h_m$ (para $D_{50} > 7$ mm. aproximadamente).

Para mayor claridad, en la Figura 11 se representan a modo de ejemplo, las curvas de variación de h_o , h_m y h_o/h_m , en función del D_{50} y para $H = 6$ m., $T = 13$ seg. Puede observarse que para el tamaño más típico de las arenas de playa, que generalmente es inferior a 0,3 mm., h_o sólo representa alrededor del 10 por ciento de h_m . Por el contrario, en las gravas h_o supera a h_m , desvirtuándose el concepto de h_m como L.T.S.

Es preciso advertir que las curvas de la figura 11, están basadas en las expresiones [19] y [20] tomadas de Swart y sólo pueden considerarse fidedignas para $D_{50} < 0,5$ mm. (Swart, 1974). Aunque los valores de h_o se pueden considerar correctos para $D_{50} = 2$ mm. (C. Garau, 1977, 1983), no hay garantía de que el resto de la Figura 10 se ajuste a la realidad. Es muy lógico admitir que para $D_{50} > 7$ mm., la expresión [20] deja de ser aplicable y $h_m \approx h_o$. A pesar de esta inseguridad, la figura 11 ilustra el gran cambio cualitativo del significado de h_o y h_m al aumentar el tamaño.

En la figura 12 se representan, sobre el gráfico de P. Vellinga las pendientes m_s , m_o , $tg \delta$ y $tg \delta'$ (para $T = 12$ s) en las hipótesis: $Ka \approx 1$, $M_p \approx M_s$. Dado que en las playas holandesas $m_p \approx 0,004$ es lógico que la curva m_s quede desplazada de los valores obtenidos para $d = 4,5$ m.

4) Esta sustancial diferencia cualitativa contribuye indudablemente a la notable dispersión de los puntos de la Figura 9. Muchos de dichos puntos corresponden a ensayos de laboratorio, cuyos perfiles se pasan a la escala del prototipo y sobre él se toma el valor de $tg \alpha$ para $d = 1,5$ m, y $d = 4,5$ m., pudiéndose dar la circunstancia de que algunos de los puntos obtenidos para $d = 1,5$ m. correspondan a m_o en lugar de $tg \delta$, mientras que algunos de los puntos obtenidos para $d = 4,5$ m. pueden corresponder a m_s en lugar de m_o . Esta diferencia cualitativa es trascendental. Sin embargo, no se ha tenido en cuenta en ninguna de las prolifi-

LAS PENDIENTES DE LA PLAYA Y EL TAMAÑO DE LA ARENA

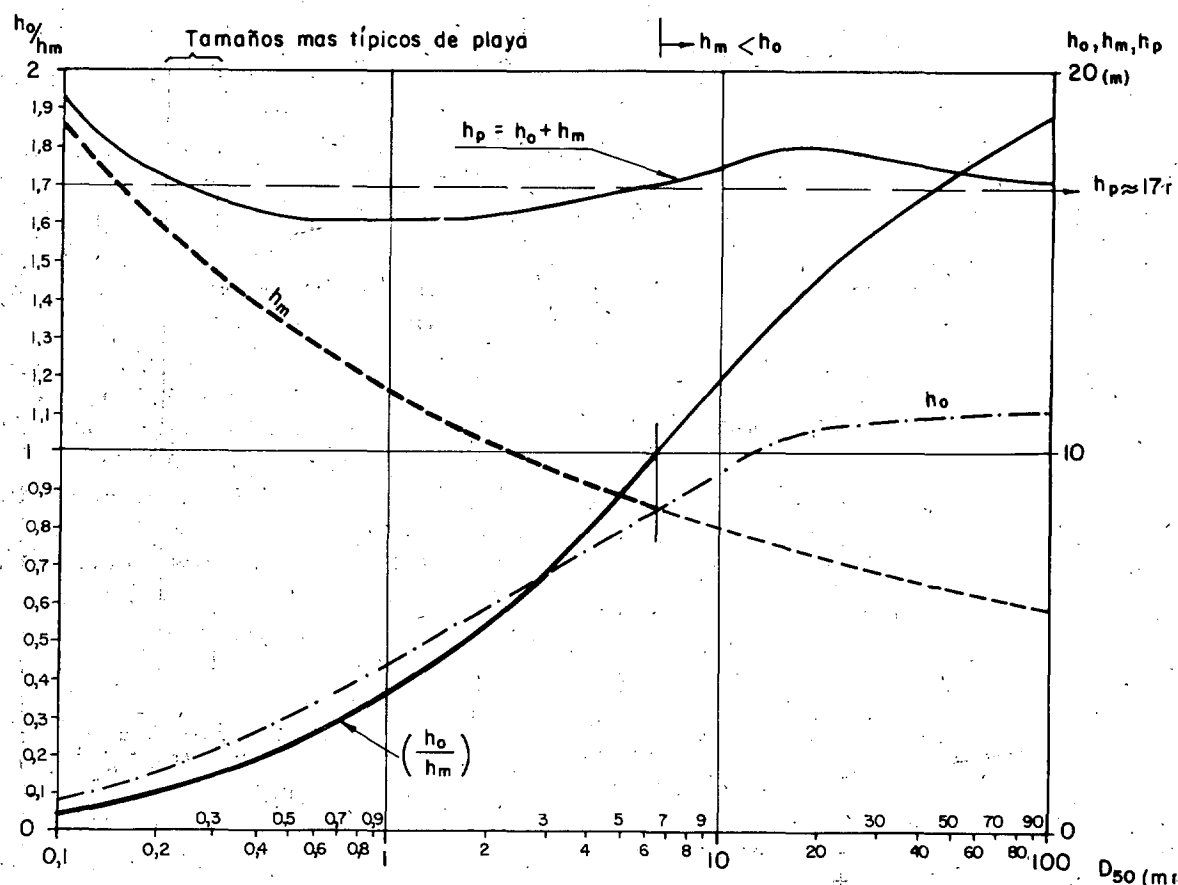


Figura 11.—Variación de h_o , h_m y h_o/h_m para $H = 6$ m., $T = 13$ seg. en función del tamaño del sedimento. (Swart, 1974).

cas e innumerables investigaciones que se realizan en diversos países, por no valorar debidamente el fenómeno de la reflexión de la ola sobre la playa descrito en C. Garau (1974). Y el problema es más grave en el ensayo en modelo reducido, ya que las escalas relacionadas con el proceso de reflexión, pueden ser diferentes de las correspondientes al proceso de rotura de la ola.

5) Digámoslo de otro modo: La relación que P. Vellinga expresa en la ecuación [28] es correcta siempre que la profundidad «d» esté alejada de la zona de transición entre la rotura y la reflexión de la ola en la orilla de la playa. Por esta razón la Figura 9 presenta cierta dispersión en los resultados correspondientes a $d = 1,5$ m., ya que éstos dan valores equiparables a $\text{tg } \delta$, ó a m_o , mientras la curva interpolada dará valores muy próximos a $\text{tg } \delta$ por ser:

$$m_o < \text{tg } \delta < \text{tg } \delta'$$

(ver C. Garau, 1984 pág. 952).

Es remarcable el hecho de que sea menor la dispersión en la curva $d = 1,5$ m. que en la curva $d = 4,5$ m. En el primer caso, todos los datos están relacionados con la reflexión, mientras que en el segundo, los datos corresponden a la zona de rotura, aunque con proximidad a la zona de influencia de la reflexión. Nótese que según [2] y [4] $\text{tg } \delta \approx 1,70 m_o$, mientras que según [1] y [4] $m_o \approx 3,22 m_s$ y por tanto la banda de variación ($\text{tg } \delta$, m_o) es más delgada que la de (m_o , m_s).

6) Respecto a la dispersión de los puntos representados en la figura 9, tomada de P. Vellinga, dicho autor manifiesta:

«La concordancia es bastante pobre, sólo la tendencia de los datos de campo concuerda con la relación hallada en los ensayos en modelo reducido. La gran dispersión de los datos de perfiles individuales de playas puede ser debida a irregularidades características de playas acrecidas tras el temporal. Mejor concordancia se obtiene cuando los datos de campo se promedian

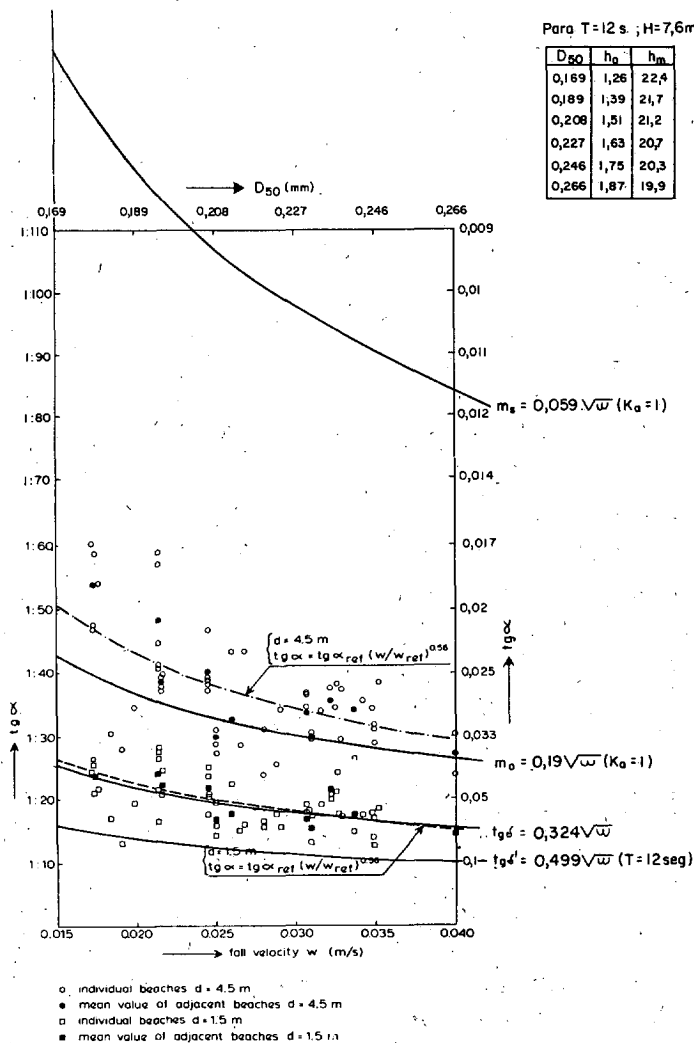


Figura 12.—Representación de las curvas: m_0 para $K_a = 1$; m_s para $K_a = 1$ y $m_0 \approx m_s$; $tg \delta'$ para $T = 12 \text{ seg.}$; y $tg \delta$; sobre el gráfico de P. Vellinga.

Nótese:

Para $d = 4,5$:

$\left\{ \begin{array}{l} > h_0 \rightarrow \text{las pendientes son algo más suaves que } m_0 \\ m_p \approx 0,0004 \\ h_m \approx 20 \text{ m.} \end{array} \right\} \rightarrow \text{las pendientes son mucho más fuertes que } m_s.$

Para $d = 1,5$:

$d < h_0 \rightarrow \text{las pendientes deben ser: } m_0 < m < tg \delta' \rightarrow m \approx tg \delta$

con cierto número de perfiles adyacentes. De este último resultado se puede sacar la conclusión de que los datos de campo confirman la relación deducida de los ensayos en modelo reducido. Por consiguiente, dicha relación puede utilizarse para predecir los perfiles de erosión y como tales para el diseño de playas (artificiales)).

Esta manifestación da mayor soporte y relevancia a lo expuesto en los puntos (3), (4) y (5).

7) Los anteriores razonamientos no deben desvirtuar la importancia fundamental de m_s como pendiente de la recta a la que puede asimilarse el perfil de la playa de arena fina. Conceptual y físicamente, $tg \delta$ es también importante. Por el contrario, $tg \delta'$ tiene casi exclusivamente un interés conceptual, mientras que m_0 es una pendiente auxiliar con la que se pretende representar o sustituir las complejas formas de barras y senos que se observan en playas de arena fina, relacionadas con el proceso de reflexión (C. Garau, 1974, pág. 879). También puede m_0 representar la zona afectada por una gran ola reflejada cuando la arena es gruesa. En ambos casos m_0 esquematiza una singularidad respecto del perfil rectilíneo.

3. DISCREPANCIAS CON LA FORMULA UNIVERSAL PROPUESTA POR P. VELLINGA (1984)

En el capítulo anterior hemos visto como la principal conclusión de P. Vellinga (1982) y los datos de su análisis de diferentes datos de playas y ensayos en modelo reducido, concuerdan perfectamente con las ecuaciones fundamentales sobre las pendientes de la playa propuestas por C. Garau (1984). Ello, junto con la observación hecha en C. Garau (1985) sobre el ajuste al perfil de la playa de la Jolla, sugiere que dichas ecuaciones tienen probablemente un alcance más universal, del que en principio podía suponerse.

Sin embargo, también se ha señalado que existe una discrepancia importante, ya que según C. Garau (1984) la relación [28] sólo es aplicable con exactitud para las profundidades $d \geq 0$ (que corresponde a $tg \delta$, aproximadamente) y $d \approx h_m$ (que corresponde a m_s), aunque esta última representa un amplio tramo del perfil (prácticamente para $2 h_0 < d < h_m$).

Con posterioridad a la publicación de P. Vellinga (1982) se produjo una discusión en la que P. Brunn (1984) sugería la posibilidad de universalizar la ecuación [28] y P. Vellinga (1984) presentó las siguientes expresiones:

PRIMERA (1983)

$$(7,6/H_{os}) \cdot y = 0,47 \cdot [(7,6/H_{os})^{1,28} \cdot (w/0,0268)^{0,56} \cdot x + 18]^{0,5} - 2 \quad [35]$$

aplicable para olas con peralte $H_o/L_o = 0,034$ (x , y , H_{os} en m; w en m/s) y que pretende representar el tramo correspondiente entre la orilla y $d = 0,75 H_{os}$.

SEGUNDA (1984)

$$y = 0,70 \cdot (H_o/L_o)^{0,17} \cdot w^{0,44} \cdot x^{0,78} \quad [36]$$

en la cual y es la profundidad bajo el nivel del agua en reposo en m, x es la distancia del punto a la orilla en m y w es la velocidad de caída para $D = D_{50}$ en m/s; $H_o = H_{os}$; $L_o = 1,56 T^2$; y H_{os} es la altura de ola significativa del clima marítimo en m.

1.ª DISCREPANCIA. — (Perfil rectilíneo-perfil parabólico). Ambas expresiones responden a la adopción de una curva potencial como representación del perfil. La primera corresponde a una parábola (exponente 0,5 para la x), mientras que la segunda utiliza un exponente de 0,78.

Respecto a esta tendencia a asimilar el perfil a una curva potencial, generalmente del tipo $y = Ax^{2/3}$ (Brunn, 1954; Dean, 1977; Hughes y Chiu, 1978), debo hacer tres claras afirmaciones:

a) La idea de un perfil con pendiente decreciente en función de la profundidad, podría interpretarse conforme con la descripción implícita en la figura 2 (C. Garau 1984, p. 949), ya que generalmente:

$$m_p < m_s < m_o < \tan \delta$$

Sin embargo, $\tan \delta$ y m_o representan tramos singulares del perfil y m_p está fuera del perfil activo, mientras que el perfil medio real, de una playa de perfil completo de arena fina y no abrigada se ajusta generalmente a una recta determinada por la orilla y el L.T.S. (C. Garau, 1984, 1985).

b) No obstante el perfil de pendiente decrecien-

te con la profundidad se ajusta a la realidad en los casos en que la singularidad representada por m_o se extiende a un amplio tramo del perfil. Estos casos corresponden en la naturaleza, a playas de arena gruesa (donde h_o es grande y puede incluso ser $h_o > h_m$ para $D_{50} > 7$ mm.) y a playas muy abrigadas (donde h_m disminuye fuertemente por el efecto de abrigo). En los ensayos en modelo reducido puede incluso ser más frecuente este tipo de perfil, puesto que al utilizar arena natural, en el ensayo se reproducen fenómenos asimilables a un prototipo de arena gruesa. (En el ensayo en modelo reducido se exagera, involuntariamente, el fenómeno de la reflexión de la ola sobre la playa. C. Garau, 1974).

c) Aunque lo expuesto en el punto b) explica la tendencia de muchos investigadores a considerar el perfil con pendiente decreciente como forma universal, cualitativamente implica una distorsión del perfil real completo. (Perfil de una playa constituida por material sedimentario hasta profundidades superiores al L.T.S., sin afloramiento alguno de fondos rocosos indeformables ni tan siquiera bajo la acción de los máximos oleajes), que en playas de arena fina se ajusta sensiblemente a una recta.

2.ª DISCREPANCIA. (Efecto de abrigo contrario al real). Con independencia de la discrepancia anteriormente expuesta, que podría considerarse como una simple diferencia de criterio al adoptar un modelo práctico para describir el perfil de las playas, la expresión [36] tomada de P. Vellinga, presenta, a mi juicio, un grave defecto:

Si comparamos los perfiles obtenidos con [36] para un mismo material, mismo período (o misma longitud de onda) y diferente altura de ola, resulta más suave el perfil correspondiente a altura de ola más reducida. Resultaría así que las playas más abrigadas ofrecerían pendientes relativamente más suaves, cuando lo contrario es un hecho ampliamente reconocido. (W. N. Bascom, 1951; S.P.M., 1973, Fig. 4:32 y 4: 33; R. Silvester; P. Brunn; C. Garau, 1984).

El anterior error queda paliado en la expresión [35] ya que ésta se limita, según el propio autor, a la condición $H_o/L_o = 0,034$. Pero es obvio que

no es lícito aplicar dicha ecuación a condiciones marítimas diferentes.

3.^a DISCREPANCIA. (El perfil parabólico: acesión o erosión frontal).

P. Vellinga propone las curvas de pendiente decreciente [35] y [36], para evaluar la erosión máxima posible de las dunas de la playa. La ecuación [35] constituye un modelo matemático ajustado a las playas holandesas, hasta profundidades $d \approx 0,75 H$, y como tal puede resultar práctico y correcto. Pero la generalización de un perfil de este tipo como perfil de erosión, contradice la descripción, que generalmente se admite, de los perfiles en escalón y en barra como perfiles de acesión y de erosión frontal, respectivamente.

COMPARACION DE LOS PERFILES PROPUESTOS

Con el fin de poder comparar cualitativamente el «perfil de erosión» propuesto por P. Vellinga (1984) y el «perfil medio esquemático» propuesto por C. Garau (1984), pondremos las expresiones [26] y [36] de la forma

$$Y = [X \cdot W^\beta \cdot H^\gamma \cdot T^\delta]^\alpha \cdot K$$

C. Garau (1984)

$$Y = [X \cdot W^{0,5} \cdot H^{-1,11} \cdot T^{1,66}]^1 \cdot 0,006 \quad [37]^*$$

P. Vellinga (1984)

$$Y = [X \cdot W^{0,56} \cdot H^{0,22} \cdot T^{-0,44}]^{0,78} \cdot 0,65 \quad [38]$$

Respecto a la primera, conviene aclarar que la ecuación corresponde a la mayor parte del

(*) Según [1] y [9] $\sqrt{w} \cdot 0,059 = 0,0255 + 0,01 \cdot \ln D_{50}$ y según [26] $m_s = (0,0255 + 0,01 \cdot \ln D_{50}) \cdot K_a - 1,11$ siendo:

$$K_a = \frac{H}{1,2 \cdot (g/62 \cdot \pi)^{3/4} \cdot T^{3/2}}$$

resulta:

$$K_a^{-1,11} = H^{-1,11} \cdot T^{1,66} \cdot 0,1017$$

y de ahí la expresión [37].

perfil descrito en las Figuras 2 y 5; sobre la cual deberían superponerse las singularidades existentes en las proximidades a la orilla, entre las cotas $+h_0$ y $-2 h_0$ aproximadamente, y es válido hasta la profundidad $-h_m$. También debe aclararse que el valor de los exponentes γ y δ de la expresión [37] se basa en el exponente provisional de K_a , que se indicaba al deducir la expresión [26].

Respecto a la segunda, además de la diferencia del tipo de perfil que se pretende describir, conviene recordar que se propone para el tramo comprendido entre la orilla y la profundidad $d \leq 0,75 H$.

Estas diferencias de enfoque, justifican una clara diferencia cuantitativa de los coeficientes, pero no, a primera vista, el cambio de signo de los exponentes. Es ilustrativo su contraste que nos permitirá apreciar las coincidencias o discrepancias cualitativas. En ambas ecuaciones, X e Y vienen en metros; H en m; T en segundos; w en m /seg.

Hechas estas aclaraciones, podemos señalar lo siguiente:

(α) El exponente de P. Vellinga (1984) se basa en una presunción de curva de pendiente decreciente que el modelo reducido tiende a exagerar. Las playas holandesas analizadas se apoyan en una plataforma $m_p \approx 0,0004$, hecho que P. Vellinga no pone de relieve. La recta propuesta por C. Garau (1983-1984) se basa en el análisis de los perfiles medios de playas de perfil completo, con diferentes valores de m_p .

Es ilustrativo observar la evolución del coeficiente α , en el mismo P. Vellinga, que varía entre las ecuaciones [35] y [36] a raíz de la sugerencia de P. Brunn:

	P. Vellinga 1983	P. Brunn 1954 Dean y otros	P. Vellinga 1984	C. Garau 1984 J. Larras, 1957 y otros
$\alpha \rightarrow$	0,50	0,67	0,78	1,00

(β) La similitud del exponente aplicado a la velocidad de caída es clara, según se ha contrastado en la figura 10. P. Vellinga (1982) lo estima en 0,56 como resultado de la interpolación, mientras C. Garau (1984) propone 0,5 por

ser el que aparece en el talud intermedio entre la reflexión y la rotura (Iribarren, 1954) que gobierna el equilibrio de la zona activa del perfil.

(γ) La discrepancia entre P. Vellinga 1984 y C. Garau 1984, sobre el tipo de variación inducida en el perfil por el aumento o disminución de la altura de ola, es puesta en evidencia por el cambio de signo de exponente γ .

Se trata probablemente de un error derivado de una exagerada atención que, incluso involuntariamente, presta P. Vellinga a la singularidad próxima a la orilla, pues es generalmente admitido que, a igualdad de las restantes variables, un aumento de la altura de olas obliga a una respuesta de la playa adoptando un perfil más suave. Probablemente P. Vellinga no se percató de tal significado del exponente positivo obtenido en sus fórmulas, pues no es lógico que ignorase un hecho tan conocido. (S.P.M.; W.N. Bascom; P. Brunn; R. Silvester; C. Garau). Al aumentar la altura de ola, mayor es la velocidad inducida al paso de la cresta, y cierto volumen de partículas puestas en suspensión se desplazan hacia el mar: la pendiente debe suavizarse en toda el área de rotura.

La diferencia cualitativa entre [37] y [38], en lo que se refiere al papel que juegan la altura de ola y el período, procede de la que media entre las expresiones [26] y [5], las cuales puestas en forma similar, resultan:

$$m_s = K_1 \cdot w^{0.5} \cdot H_s^{-1.11} \cdot T_s^{1.66} \quad [26], [37]$$

$$\text{tg } \delta' = K_2 \cdot H_o^{0.5} \cdot T_o^{-1} \quad [5]$$

La ecuación [5] corresponde a la zona de flujo y reflujo, en la cual la ola residual que alcanza el pie del frente de la playa, determina el talud instantáneo según la fórmula de Iribarren. Así, resulta que el proceso de reflexión, que implica una respuesta rápida (tiempo de relajación de algunos minutos) a las condiciones H_o , T_o de cada estado del mar, relaciona la pendiente del frente de la playa de forma directa con la altura e inversa con el período. Y esta es la razón de que P. Vellinga obtenga tal tipo de relación en su expresión [38], puesto que siempre contempla la zona sumergida muy próxima a la orilla y además se basa en datos de ensa-

yos en modelo reducido que generalmente exageran el efecto de reflexión.

Por el contrario, la pendiente general del perfil, definida por la orilla y el L.T.S., y que se justifica a un tramo sustancial en las playas de arena fina, guarda una relación contraria a la anteriormente descrita, respecto a las características H_s , T_s de los oleajes máximos, significativos del régimen de oleajes a que está sujeta la playa. Este comportamiento es bien conocido, pues se sabe que a mayor abrigo (reducción de altura de ola, pero no de período) mayor pendiente ofrece el perfil activo de la playa. Y ésta fue la razón de introducir el coeficiente de abrigo K_a en la expresión [26].

La comparación de los valores asignados a γ y δ en [5], [38] y [37]:

	[5]	[38]	[37]
$\gamma \rightarrow$	0,5	0,22	-1,11
$\delta \rightarrow$	-1,0	-0,44	1,66

nos indica que P. Vellinga debió utilizar datos correspondientes a situaciones intermedias aunque más bien próximas al dominio de la ecuación [5]. El análisis representado en la Figura 9, se hace para $d = 1,5$ m. cuyos datos corresponderán a la zona de máxima influencia de la reflexión, y para $d = 4,5$ m., cuyos datos podrían corresponder a uno u otro tipo. Si P. Vellinga se basó en estos mismos datos para determinar el valor de γ , es fácilmente explicable que obtuviese $\gamma = 0,22$.

(δ) algo similar ocurre con el exponente δ del período. Es sabido que, a igualdad de las restantes variables, al aumentar el período las partículas, puestas en suspensión al paso de la cresta de la ola, tienen más tiempo, para volver a depositarse, que antes. Así pues, el aumento del período conduce a un perfil de equilibrio de pendiente más fuerte en la zona de rotura. Por consiguiente, el exponente δ debe ser positivo.

No es preciso repetir los razonamientos sobre la presumible influencia de la ecuación [5] en los datos utilizados por P. Vellinga. No obstante conviene señalar que P. Vellinga presupone que la variable a considerar es el peralte, y por tanto admite una relación fija entre γ y

δ . Así, en las ecuaciones [5] y [38] se cumple ($\delta = -2\gamma$) mientras que la ecuación [37] se ajusta a la relación ($\delta = -1,5\gamma$) por haberse observado que el coeficiente de abrigo $H/H_0 = H/1,2 (g/62 \cdot \pi)^{3/4} \cdot T^{3/2}$ es la variable fundamental para la pendiente del perfil en la zona de rotura de la ola.

4. CONCLUSIONES

4.1. Perfil general

Los resultados de P. Vellinga (1982), confirman la bondad de la descripción del perfil de equilibrio expuesta por C. Garau (1974, 1984) mientras que las tentativas de generalización de P. Vellinga (1983, 1984) de un perfil de pendiente decreciente con la profundidad, no resultan consistentes. Puede por tanto adoptarse una expresión general del «perfil medio esquemático» de una formación sedimentaria completa, apoyada sobre una base de pendiente m_p , según la ecuación:

$$Y = X \cdot (0,0255 + 0,01 \ln D_{50})$$

$$H_s^{-1,11} \cdot T_s^{1,66} \cdot 0,1017 \cdot \varphi(m_p) \quad [39]^*$$

(D_{50} en mm.)

en la cual

$$\varphi(m_p) > 1,15 \text{ si } m_p < 0,5 m_s$$

$$\varphi(m_p) < 0,85 \text{ si } 3 m_s < m_p$$

pudiéndose tomar:

$$\varphi(m_p) = 1 \text{ si } 2/3 m_s < m_p < 3/2 m_s$$

(C. Garau, 1984 pág. 957)

Sin embargo, en su aplicación deben tenerse presentes todos los aspectos conceptuales y descriptivos expuestos en C. Garau 1984, y en particular:

(*) Si se utiliza la altura de ola dada por la fórmula de Iribarren $H = 1,2 (g/62 \cdot \pi)^{3/4} \cdot T^{3/2} = 0,1276 \cdot T^{3/2}$ resulta: $H^{-1,11} \cdot T^{1,66} \cdot 0,1017 = 1$.

a) La expresión [39] debe completarse con las deformaciones representadas por $\tan \gamma$ y m_0 en la Figura 5. Cuando el abrigo es importante, y $m_p < m_s$, el perfil esquemático se adapta mejor al modelo de la Figura 7, tanto más cuanto mayor sea el tamaño del sedimento.

b) La expresión [39] no es aplicable cuando en el perfil activo (zona comprendida entre $+h_0$ y $-h_m$) existe un sustrato rocoso que aflore o pueda aflorar bajo las condiciones extremas del clima marítimo.

c) Tampoco se podrá aplicar la expresión [39] cuando la formación sedimentaria esté sujeta a un transporte hacia el mar (offshore) importante.

d) Sin embargo, incluso en las situaciones b y c, la comparación del perfil real de la playa con el obtenido con la ecuación [39], aporta una información valiosa sobre las condiciones de equilibrio del perfil.

4.2. Relación de proporcionalidad

En algunos tipos de problema, como pueden ser los relacionados con el relleno artificial de una playa, se conoce el perfil medio de referencia, el tamaño del material nativo (D_{50}) ref, y el tamaño del material de regeneración D_{50} . En este caso, y en otros del mismo tipo en que no varía el clima marítimo, puede deducirse el perfil medio tras la regeneración, aplicando la relación

NOTA: Aunque la situación c) es poco frecuente, el análisis de la playa de Torredembarra (Tarragona) indica que un transporte frontal de unos 25 m³/año por metro lineal de orilla, hacia alta mar (Offshore), representa un factor 1,8 que mayor el valor de la pendiente dada por [39]. La existencia de un transporte contrario, hacia la orilla (Onshore), implicaría un factor de minoración de la pendiente. En ambos casos puede decirse que la existencia de un transporte frontal no nulo, significa una inmadurez del perfil. En tales casos se desvirtúan algunos aspectos del concepto de L. T. S., si bien el transporte que se produce a través de él, tiene generalmente el carácter de irreversible.

P. Torredembarra: $K_a = 0,85$; $D_{50} = 0,26$ mm.;

m_s (real) = 0,026

[26] $\rightarrow m_s$ (teórica) = 0,0144;

luego: m_s (real) = m_s (teórica) $\times 1,8$

que cumplen todas y cada una de las pendientes $\text{tg } \delta$, $\text{tg } \delta'$, m_o , m_s y las expresiones [1], [2], [4], [5], [7], [10], [14], [26], [27] y [28]. A saber:

$$\text{tg } \alpha = \text{tg } \alpha_{\text{ref}} \cdot \frac{2,5 + \ln D_{50}}{2,5 + \ln (D_{50})_{\text{ref}}} \quad [40]$$

(D_{50} en mm.)

Esta expresión puede aplicarse con exactitud para definir el perfil activo, salvo en el tramo comprendido entre la orilla y el punto de profundidad $-2h_o$, tomándose este valor para el D_{50} mayor. No obstante también en dicho tramo se obrendrá una buena aproximación si la diferencia de tamaño no es muy grande, pues en tal caso, la diferencia entre $2 h_o$ y $(2 h_o)_{\text{ref}}$ tampoco será grande.

Cuando la proporción de material añadido respecto al nativo no sea suficiente para impedir cualquier tipo de mezcla, será necesario analizar los posibles procesos de mezcla y los perfiles resultantes del tamaño correspondiente a cada mezcla.

4.3. Singularidad de las playas holandesas

Hay una circunstancia muy particular de las playas holandesas, que dificulta su generalización y es la suavidad de la plataforma de apoyo. Una pendiente $m_p \approx 0,0004$ implica que la pendiente m_s de dichas playas será más fuerte que las apoyadas en otro tipo de plataformas.

5. CONSIDERACION FINAL

El establecimiento de unas relaciones que ligan la pendiente y el tamaño de la arena con un error de unas pocas micras y la presunción de un posterior y mejor ajuste, presupone la posibilidad de establecer el tamaño de la masa sedimentaria con el mismo margen de error.

El sistema que se preconiza en la publicación del CERC «Review of design elements for beach — fill evaluation» requiere una labor larga y costosa, ya que presupone la toma sistemática de

gran número de muestras en todo el perfil sumergido, en situación de verano y de invierno. Sin embargo, desde hace varios años, vengo utilizando un método más simple que con tomas de muestras subaéreas, permite asignar el tamaño de la masa sedimentaria con buena fiabilidad. Espero que los resultados de su aplicación sistemática a un caso concreto que estoy estudiando, confirme mis predicciones y, a la vista de ello, proponerlo en un próximo artículo.

BIBLIOGRAFIA

- BASCOM, W. N. (1951): «*The relationship between Sand size and beach face slope*». (Trans. Am Geophys. Union, 32: 866-874).
- BRUNN, P. (1984): «*Beach and dune erosion during Storm Surges, by P. Vellinga, Discussion*». (Coastal Engineering, 8, 171-176, Elsevier. Amsterdam).
- CHESNUTT, CH. B. y C. J. GALVIN, jr.: «*Lab. profile and reflection, changes for H/L = 0,02*». Proceedings 14th Coastal Engineering, pp. 985 a 977, 1974.
- ESPINET, J. (1973): «*Estudio de las playas del Delta del Llobregat*» (no publicado).
- GARAU, C. (1974): «*Reflexión del oleaje sobre la playa*». R. O. P. dic. 1974.
- GARAU, C. (1983): «*Estudio de la Geomorfología reciente y de los procesos litorales de las playas de Barcelona*» (no publicado). E. 1: «*Evolución del delta del río Besós*». E. 2: «*Evolución del delta del río Llobregat*». E. 3: «*Procesos litorales. I. Dinámica litoral. II. La altura del paralelogramo de transporte significativo y la progradación deltaica*». E. 4: «*Estimación de la capacidad de transporte sólido en función del clima marítimo*». E. 5: «*Estimación de los procesos históricos de aportación, depósito, erosión y transporte en el litoral comprendido entre Punta Palomera (Blanes) y el mazo de Garraf (Sitges)*».
- GARAU, C. (1983): «*Estudio de la dinámica litoral en el entorno del puerto deportivo de Santa Eulalia. Ibiza*» (no publicado).
- GARAU, C. (1984): «*Informe sobre la playa de la Ciudad Jardín. Palma de Mallorca*» (no publicado).
- GARAU, C. (1984): «*Las pendientes de la playa y el tamaño de la arena*» (R. O. P. dic. 1984 pág. 943-960).
- GARAU, C. (1985): «*Comentarios al artículo anterior*». (R. O. P. marzo 1985. pág. 195-198).
- GOURLAY, M. R. (1980): «*Beaches: Profiles, processes and permeability*». Proceedings 17th Coastal Engineering, p. 1320-1339.
- HATTORI, M. (1982): «*Field study on onshore-offshore sediment transport*». Proceedings. 18th Coastal Engineering. p. 923-940.
- HALLERMEIER, R. J.: «*Uses for a calculated limit depth to beach erosion*». Proceedings. 16.ª Coastal Engineering. p. 1493-1512.

- IRIBARREN, R. (1954): «Obras marítimas. Oleajes y diques». Dossat, S. A.
- INMAN, D. L. (1983): «Application of Coastal Dynamics to the Reconstruction of Paleocoastlines in the vicinity of La Jolla, California» (Quaternary Coastlines and Marine Archaeology. Academic Press p. 1-49).
- JOHNSON, D. I. (1983): «The California Continental Borderland: Landbridges, Watergaps and Biotic Dispersals» (Quaternary Coastlines and Marine Archaeology. Academic Press, p. 481-527).
- KRIEBEL, D. I. y DEAN, R. G. (1984): «Beach and Dune Response to Severe Storms». (Proceedings, 19th Coastal Engineering, Houston, p. 1584-1599).
- LARRAS, J. (1957): «Plages et cotes de sable». Ed. Eyrolles.
- LE MEHAUTE, B. (1970): «Comparison of fluvial and Coastal similitude». (Proc. XII Coastal Eng., Washington, USA, ASCE. pp. 1077-1096).
- SAYÃO, S. P. y GUIMARÃES, J. D. (1984): «Experimental verification of similarity criteria for equilibrium beach profiles» (Proceedings 19th Coastal Engineering, Houston, p. 1342-1359).
- S. ARMY, C. I. H. C. (1973-1977): «Shore protection manual».
- SHEPARD, F. P. (1963): «Submarine geology».
- SUNAMURA, T. y K. HORIKAWA (1974): «Two-dimensional beach transformation due to waves». Proceedings 14th Coastal Engineering p. 920-938.
- SWART, D. H. (1974): «A schematization of onshore-offshore transport». Proceedings 14th Coastal Engineering. p. 884-900.
- VELLINGA, P. (1978): «Movable bed model tests on dune erosion». (Proceedings. 16th Coastal Engineering, Hamburg, pp. 2020-2039).
- VELLINGA, P. (1982): «Bach and dune erosion during storm surges». (Coastal Engineering, 6: 361-387. Elsevier. Amsterdam).
- VELLINGA, P. (1984): «A tentative description of universal erosion profile for Sandy Beaches and Rock Beaches». (Coastal Engineering, 8, 177-188).
- VON HIJUM, E. (1974): «Equilibrium profiles of coarse material under wave attack». Proceedings. 14th Coastal Engineering. pp. 939-957.

Carlos Garau Sagristá



Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, promoción 1960.

DAD-IESE (Universidad de Navarra, 1972). Es ingeniero jefe de la zona Portuaria II-III de la Comissió de Ports de Catalunya. Ha sido jefe regional de Costas de Cataluña, 1964-1973; jefe de la División de Aprovechamientos Hidráulicos (CAPO). 1974-1977; director del Grupo de Puertos

de Barcelona-Tarragona, 1977-1981; director de la Comisión de Puertos de Cataluña, 1977-1981; profesor de «Puertos» y «Puertos Obras» en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Canales, Caminos y Puertos de Barcelona, 1976-1979.

Autor de numerosos proyectos de obras portuarias y de Ingeniería de Costas. Ensayos en modelo reducido en el tanque (modificado) del Laboratorio de Hidráulica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona, 1973-1975. Autor de diversos artículos, comunicaciones y conferencias, sobre movimientos de arenas y playas. Proyectos destacados: Puerto y Marina interior en la Urbanización Bahía Blanca, Villajoyosa, Alicante. Plan de Infraestructura de las Playas de Levante de Barcelona (director del proyecto). Estudios de Playas: Girona (todas las de la provincia y especialmente: Golfo de Rosas, Bahía de Pals, Llafranc, Bahía de Palamós, San Feliú de Guisols, Tossa, Lloret, Blanes). Barcelona (todas las de la provincia, y especialmente: Tramo Blanes-Sitges, incluidos los deltas del Tordera, Besós y Llobregat, y Vilanova y la Geltrú). Tarragona (todas las de la Provincia y especialmente: tramo Cubellas-Torredonbarria, Salou, Cambrils y algunos aspectos del delta del Ebro). Castellón (Burriana). Alicante-Murcia (Tramo Sta. Pola-C. Palos, y en especial San Redro del Pinatar). Málaga (tramo Meliá Don Pepe, Marbella). Baleares (todas la de la provincia y especialmente: S'epalmador y S'es Illetes en Formentera; Es codolas, Es Cavallet, Den Bossa, y Santa Eulalia, en Ibiza; P. de Palma, Magaluf, Ciudad Jardín, Alcúdia-Can Picafort, San Baulo, Cala Sa Font, en Mallorca; Algayarens, Arenal d'En Castell, Illa d'En Coloin, Santa Galdana, Iurqueta, Trobelutja, en Menorca).