

Introducción a la evaluación del transporte sólido longitudinal neto

JOSÉ MARÍA MEDINA VILLAVARDE (*)

RESUMEN En el presente artículo se desarrollan los dos sistemas teóricos más utilizados para el cálculo del transporte sólido. En el Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEPYC) del CEDEX se realizaron varios estudios relativos a la zona del delta del Llobregat. En ellos se calcula el transporte sólido litoral mediante la fórmula del CERC, a partir de los datos de observaciones visuales de oleaje, contenidos en el banco de datos del *National Weather Records Center* (Carolina del Norte, EE.UU.). En una segunda parte, se utiliza la base de datos de movimientos de la línea de orilla, propiedad del CEDEX, para calcular, mediante la ecuación de continuidad, la tasa de transporte interanual real sufrida por el delta desde el año 1946.

LITTORAL NET SOLID TRANSPORT EVALUATION

ABSTRACT In this paper, the two most known theoretical methods of computing solid transport are developed. Several studies on the Delta of Llobregat (Barcelona, Spain) zone, have been carried out by the Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEPYC) of the CEDEX. In the second part, to be published soon, solid transport is calculated in them, using the CERC formula, from the visual observations from the database of the National Weather Records Center of Asheville (North Carolina, U.S.A.). In this paper, continuity equation is used to calculate the real hyperannual solid transport rate in the Delta, since 1946.

Palabras clave: Dinámica litoral; Llobregat; Perfil transversal; Playas; Transporte sólido.

1. INTRODUCCIÓN

La corriente de transporte sólido litoral está constituida por el material (generalmente arena), que se mueve a lo largo de la costa, debido principalmente a la acción del oleaje. Esta corriente fluye en ambos sentidos. Se denomina *bruto* cuando incluye tanto el transporte en una dirección como en la opuesta, a lo largo del período de medida, debido a las condiciones cambiantes de las temporales. Transporte *neto* es el que indica la diferencia de volumen moviéndose en uno y otro sentido; es la *resultante* del transporte sólido, y el principal responsable de la evolución de las playas.

El transporte sólido longitudinal presenta tres componentes principales: la debida a oblicuidad del oleaje en rotura (del tipo $Q = K(E-C_p) \sin 2\theta_b$), la producida por gradiente de sobre-elevación de altura de ola (en zonas de difracción, principalmente, con una expresión similar a

$Q = B \cdot H_s^{3/2} \left(\frac{3}{2} - \cos^2 \theta_b \right) \frac{\partial H_b}{\partial y}$), y la debida a variación del ángulo de ataque (que puede expresarse como $Q = C \cdot H_s^{3/2} \sin \theta_b \frac{\partial \theta_b}{\partial y}$). En las expresiones anteriores, puramente indicativas, se utiliza la notación común em-

pleada durante todo el texto, y se puede consultarse en el apartado 9 del mismo.

En el presente artículo se comenta la fórmula del transporte sólido litoral debido al flujo de energía del oleaje (oblicuidad en rotura) y se analizan las diferencias de apreciación del transporte obtenidas, por una parte, mediante métodos empíricos, y por otra, con ayuda de la ecuación de continuidad.

Como aplicación práctica, se exponen los resultados obtenidos en el delta del Llobregat (Barcelona), y las playas situadas al sur, limitadas por el Puerto de Ginestà y el macizo del Garraf.

1.1. CÁLCULO DEL TRANSPORTE SÓLIDO

El cálculo del transporte sólido debe abordarse según el proceso siguiente, según las recomendaciones contenidas en el *Shore Protection Manual* que a continuación se relacionan, ordenadas de más a menos fiabilidad:

- 1) El mejor método consiste en utilizar la tasa de transporte conocida en una zona cercana y adaptarla variando las condiciones locales.
- 2) Si no pudiera emplearse el método anterior, por falta de datos, puede utilizarse el movimiento histórico de la línea de orilla, volúmenes de dragado en puertos cercanos, etc, según se comenta en el presente artículo.
- 3) Utilizar, con datos de oleaje calculados, o mejor aún, medidos, una expresión empírica de transporte sólido.
- 4) Calcular la tasa de transporte bruto, como cota superior del transporte neto.

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director del Programa de Modelos Matemáticos. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEPYC).

2. LA FÓRMULA DEL FLUJO DE ENERGÍA

2.1. CONSIDERACIONES PREVIAS

La obtención de la fórmula empírica de transporte sólido que en el presente artículo se comenta, es una de las más utilizadas para los estudios teóricos de dinámica litoral. Sin embargo, está sujeta a unas consideraciones que deben ser tenidas en cuenta para evitar errores de interpretación.

- 1) La batimetría de la playa ha de ser rectilínea y paralela.
- 2) El material sólido ha de ser arena. Como se verá, el único dato que pide la expresión del transporte sólido, es relativo al oleaje, lo cual constituye una postura poco realista, dado que el tamaño del material influye notablemente en su transporte por el oleaje. Debido a ello, Komar e Inman (1970) introducen un coeficiente K_s que, según Dean et al. (1982) varía de acuerdo con el tamaño del sedimento.

Ello hace que los resultados del estudio teórico deban ser aceptados con cierta reserva, debiendo ser interpretados correctamente en cada caso, a la luz de la experiencia.

2.2. FÓRMULA DE TRANSPORTE

La fórmula empírica del flujo de energía es una de los medios teóricos más utilizados para la evaluación del transporte sólido, en función de las características del oleaje. Su expresión general es:

$$Q = K(E\epsilon_b)_b \sin 2\theta_b$$

donde los subíndices b indican valores en rotura. El ángulo θ representa la oblicuidad del oleaje; el producto $(E\epsilon_b)$ es el flujo de energía, y K es una constante. Estas expresiones proporcionan el caudal sólido que, potencialmente, atraviesa una sección de playa en unas condiciones determinadas de oleaje.

En aguas poco profundas y admitiendo la teoría lineal de oleaje, esta fórmula se puede escribir como:

$$Q = A \cdot H_b^{\frac{5}{2}} \sin(2\theta)_b$$

donde A es una nueva constante.

Otra variante a esta expresión, con datos de oleaje en profundidades indefinidas, se escribe, con H_b en pies y Q en $\text{yd}^3/\text{año}$, como:

$$Q = 1.373 \cdot 10^5 \cdot f \cdot H_b^{\frac{5}{2}} F(\theta_b)$$

donde f es la frecuencia decimal de presentación del temporal, y $F(\theta)$ una función de la oblicuidad, cuya expresión es:

$$F(\theta_b) = \left\{ (\cos \theta_b)^{\frac{1}{2}} \sin 2\theta_b \right\}$$

En unidades métricas ($1 \text{ m} = 1.0936 \text{ yd}$; $1 \text{ pie} = 0.3048 \text{ m}$) se obtiene:

$$Q = 2.0467 \cdot 10^5 \cdot f \cdot H_b^{\frac{5}{2}} F(\theta_b)$$

La expresión de la función $F(\theta)$ debe ser discutida. Un sistema muy popular de obtención de datos consiste en utilizar los registros de observaciones visuales de oleaje. Son recogidos por barcos en ruta, obteniéndose, entre otros, los datos referentes a posición del barco, dirección del temporal, altura de ola significativa y período (ver figura 2.1). Los programas realizados por el Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX para gestionar el banco de datos obtienen los mismos agrupados en sectores predefinidos. En caso de obtenerse datos poco precisos sobre dirección de temporales (p. ej.: referidos a un sector), puede ser utilizada esta expresión. Sin embargo, pueden introducirse errores grandes: baste comprobar como, para un caso en que $\theta = 0$, se tendrá $F(\theta) = 0$. Por ejemplo, cuando los datos se obtienen en sectores de $2\alpha^\circ$: existirán multitud de datos en el sector centrado en 0° ($-\alpha^\circ < \theta < +\alpha^\circ$), representado por $\theta = 0^\circ$, que no contribuirán al transporte sólido (produciéndolo realmente, dado que en general, cada uno de ellos será, independientemente,

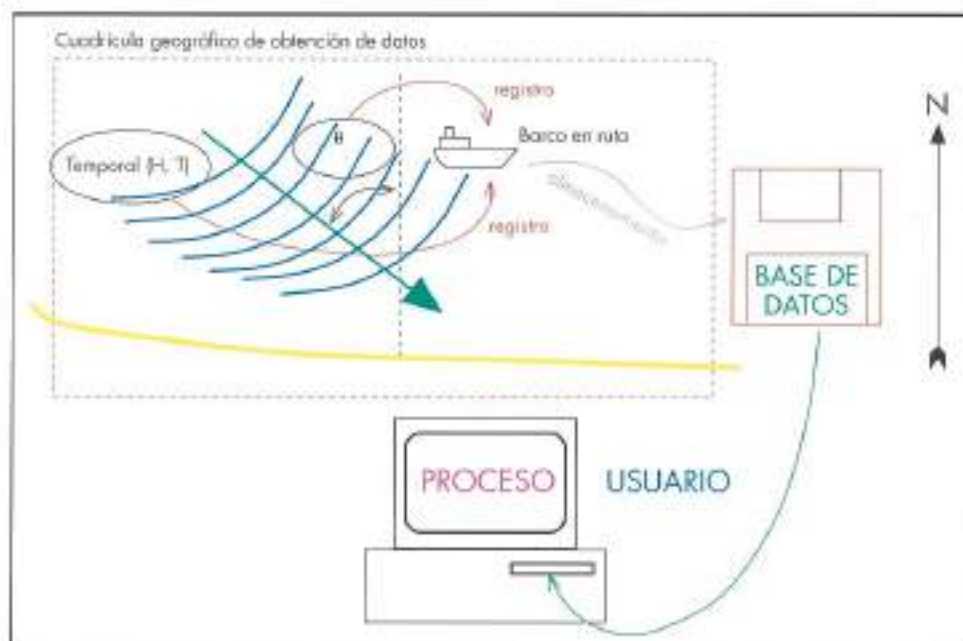


FIGURA 2.1. Obtención de datos visuales de oleaje.

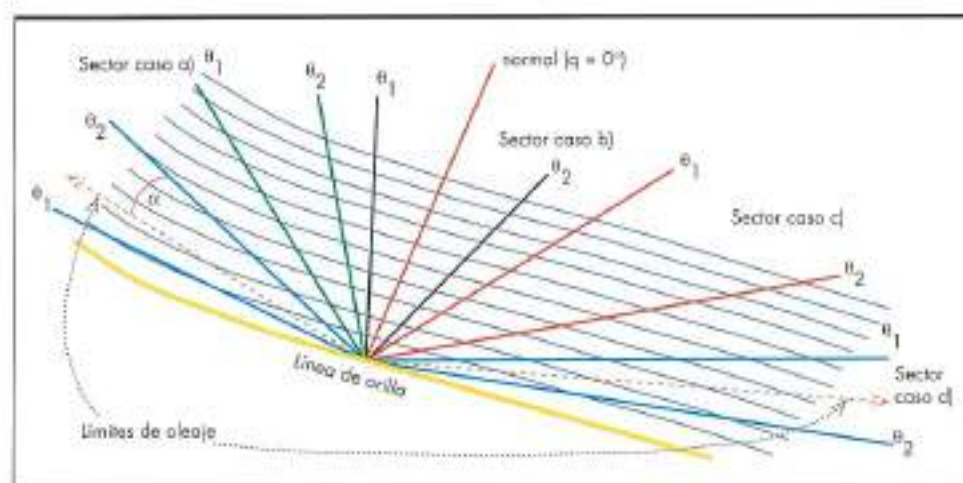


FIGURA 2.2. Esquema de definición de límites de sectores.

$\theta < 0^\circ$), por ser $F(\theta) = 0$, lo que es correcto siempre que la oblicuidad del oleaje sea nula, puesto que el temporal arriba a la costa sin oblicuidad y no puede producir transporte. Ello no tendría relevancia si los datos fueran simétricos y el transporte consiguiente se anulará; ello no ocurrirá en general: habrá temporales con oblicuidad reducida que en la práctica producirían transporte, que sería despreciado en el cálculo. Si el ángulo α es suficientemente pequeño, la contribución al transporte sólido también lo será, por reducirse el factor de oblicuidad, y por tanto, minimizarse el error introducido.

La función F se sustituye por su valor medio para introducir el efecto de la dispersión de oblicuidades en los sectores.

Para integrar la función F se hace el cambio siguiente:

$$F(\theta) = \left(\cos \theta \right)^{\frac{1}{4}} \sin 2\theta = 2 \cdot \sin \theta \cdot (\cos \theta)^{\frac{5}{4}}$$

Integrando, se obtiene

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} F(\theta) d\theta = 2 \int_{\theta_1}^{\theta_2} (\cos \theta)^{\frac{5}{4}} \sin \theta d\theta$$

y de aquí,

$$\bar{F}(\theta) = \frac{1}{(\theta_2 - \theta_1)} \cdot \frac{180}{\pi} \cdot \frac{8}{9} \left[(\cos \theta_2)^{\frac{9}{4}} - (\cos \theta_1)^{\frac{9}{4}} \right]$$

(ángulos en grados).

Sustituyendo esta expresión en la del transporte sólido, se obtiene:

$$Q = 1.042 \cdot 10^8 \frac{1}{(\theta_2 - \theta_1)} \cdot f \cdot H_0^{\frac{5}{2}} \left[(\cos \theta_2)^{\frac{9}{4}} - (\cos \theta_1)^{\frac{9}{4}} \right]$$

con los ángulos en grados (y medidos en profundidades indefinidas).

Los límites de integración están referidos al sector de cálculo, tomando la normal a la costa como origen de ángulos. Se pueden diferenciar tres casos, según la posición del sector cuya contribución al transporte sólido se desea calcular (ver figura 2.2):

- El sector cae a la izquierda de la normal. En este caso, ambos ángulos son negativos: $\theta_1 < 0$, $\theta_2 < 0$.
- El sector es dividido por la normal. En este caso, $\theta_1 < 0$, $\theta_2 > 0$, y el sector se subdivide en otros dos: $(\theta_1, 0)$ y $(0, \theta_2)$.

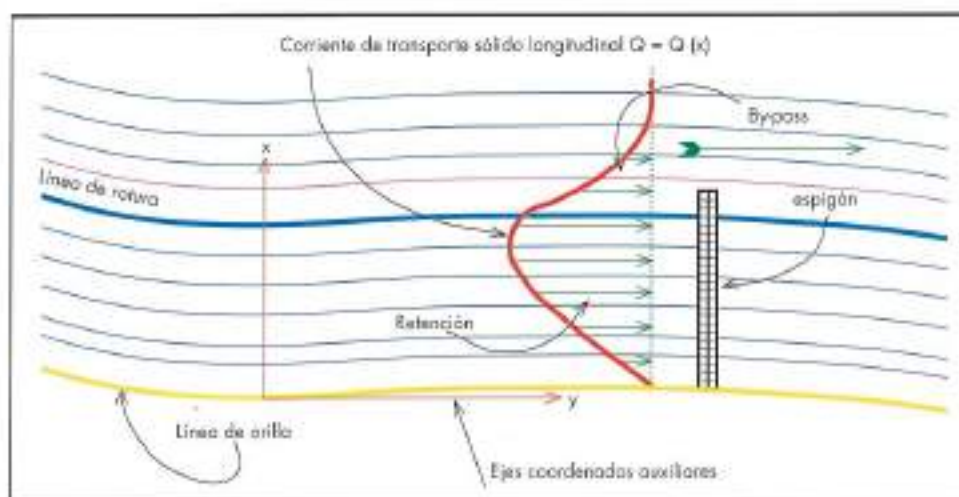


FIGURA 3.1. Retención de la corriente de transporte sólido por un espigón.

c) El sector cae a la derecha de la normal. En este caso, ambos ángulos son positivos: $\theta_1 > 0$, $\theta_2 > 0$.

d) El sector es dividido por alguno de los límites de oleaje. La solución consiste en promediar la frecuencia de presentación del sector. Para evitar errores, dado que este artificio es únicamente una aproximación que no puede ser soslayada (según en qué formato se obtengan los datos) conviene, de nuevo, que la amplitud del sector sea tan pequeña como sea posible. La frecuencia f_s de la porción de sector considerada sería:

$$f'_s = \frac{f_s}{|\theta_1 - \theta_2|} \alpha$$

donde f_s es la frecuencia de presentación del sector total.

Realmente, la función de transporte, integrada debe tratar estos casos automáticamente, no obstante lo cual, conviene chequear los resultados obtenidos en sectores singulares.

De cualquier forma es preciso tomar en consideración los signos, que, según el convenio que se adopte, indicarán que el transporte sólido toma una u otra dirección.

3. DISTRIBUCIÓN TRANSVERSAL DEL TRANSPORTE SÓLIDO LONGITUDINAL

La corriente de transporte sólido longitudinal presenta una distribución transversal no uniforme, con un máximo en las proximidades del punto de rotura.

Entre las muchas utilidades que presenta el conocimiento de la distribución transversal del transporte sólido longitudinal, se puede citar la más intuitiva: permite dimensionar la longitud de un espigón diseñado, por ejemplo, para estabilizar una playa, en cuanto a su capacidad de retención de arenas u sotamar, obteniendo, asimismo, el volumen de *hy-poes* para una longitud determinada.

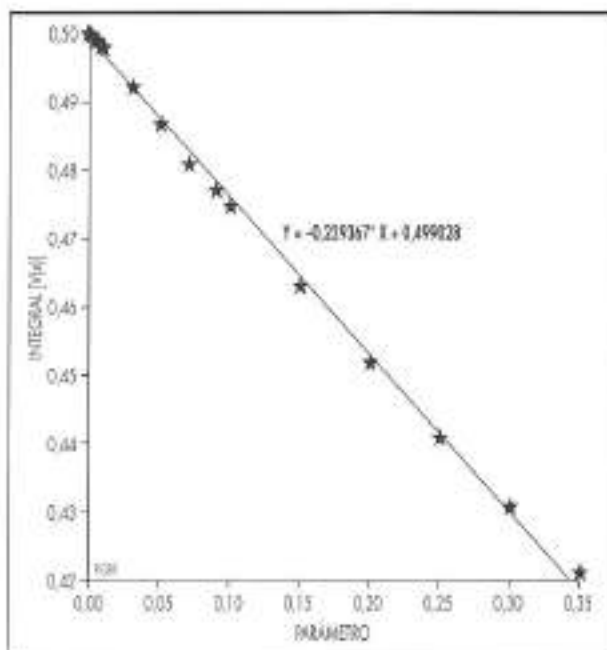


FIGURA 3.2. Área encerrada bajo la curva de distribución de velocidades en función del parámetro P .

La figura 3.1 esquematiza lo expuesto en el párrafo anterior.

Si la corriente de transporte sólido longitudinal, medida en una sección normal a la playa, presenta un valor total Q_x , y se representa por x la coordenada normal a la playa (ver figura 3.1), la curva $Q(x)$ buscada como ley de distribución transversal de la corriente de transporte sólido debe verificar:

$$Q_x = \int_0^x Q(x) dx$$

Según Longuet-Higgins (1972), los efectos de fricción lateral de la corriente longitudinal producen una distribución transversal no uniforme a la velocidad del flujo, con un máximo en torno a la línea de rotura (ver figura 3.1).

La formulación de esta distribución utilizará las siguientes coordenadas y parámetros:

a) Por una parte, la abscisa normalizada, $X = \frac{x}{x_0}$, donde x_0 ,

indica, con la notación habitual, la coordenada del punto de rotura (en este caso, distancia a la línea de orilla).

b) Por otra, el parámetro P , definido como $P = \frac{\pi \cdot \tan \beta \cdot N}{2 \cdot \alpha \cdot C}$,

donde son: $\tan \beta$, la pendiente del fondo; N , una constante adimensional; α , una constante empírica, cuyo valor se sitúa en torno a 0.4; y C , un coeficiente representativo de la fricción con el fondo. Su valor se sitúa en torno a 0.01, según investigaciones realizadas por Prandtl (1952), Bretschneider (1954) y Meyer (1969). El valor de N ha sido acotado superiormente por $N = 0.010$ por Galvin e Eagleson (1965), por lo que puede tomarse este valor a falta de uno mejor.

c) Se definen también los parámetros p_1 y p_2 como

$$p_1 = -\frac{3}{4} + \sqrt{\frac{9}{16} + P^{-1}} \quad \text{y} \quad p_2 = -\frac{3}{4} - \sqrt{\frac{9}{16} + P^{-1}}$$

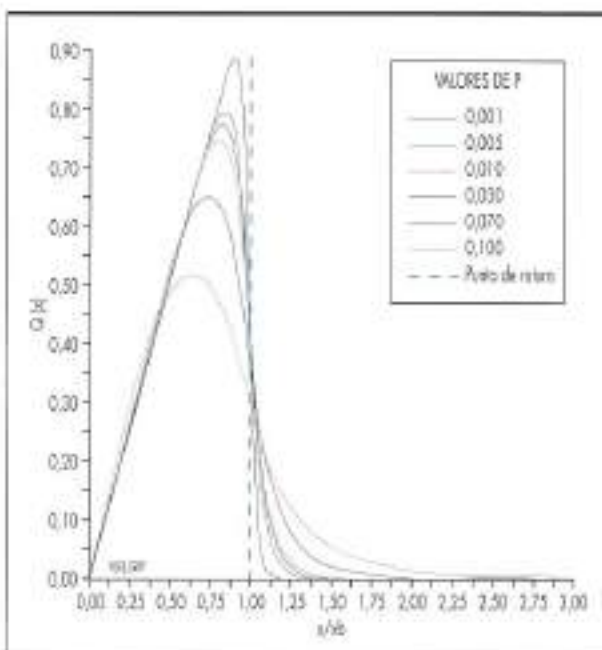


FIGURA 3.3. Variabilidad de la curva de distribución de velocidades con el parámetro P .

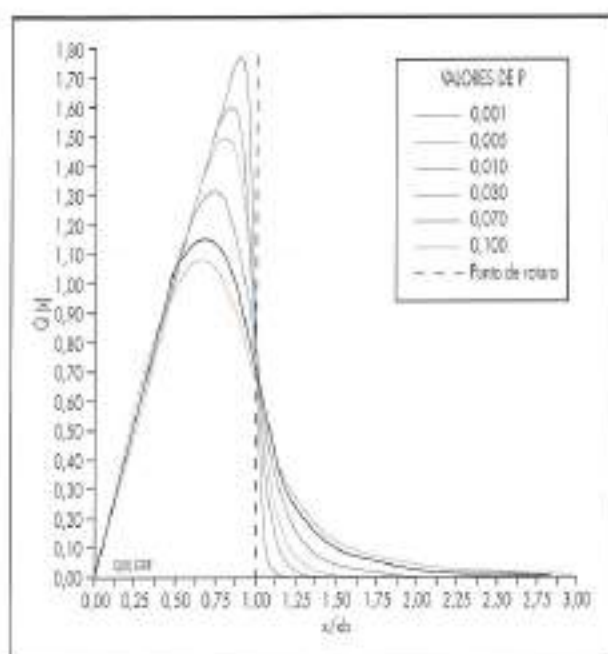


FIGURA 3.4. Variabilidad de la curva de distribución de caudales propuesta con el parámetro P.

d) A partir de ellos, los coeficientes A , B_1 y B_2 se definen como:

$$A = \frac{1}{1 - 2.5 \cdot P}$$

$$B_1 = \frac{p_2 - 1}{p_1 - p_2} A$$

$$B_2 = \frac{p_1 - 1}{p_1 - p_2} A$$

En estas condiciones, se tiene la distribución transversal de velocidad:

$$V(x) = A \cdot X + B_1 \cdot H^{p_1} \quad 0 \leq X \leq 1$$

$$V(x) = B_2 \cdot X^{p_2} \quad 1 \leq X \leq \infty$$

que debe ser calibrada con datos reales, si se dispone de ellos, debido a la incertidumbre en algunos de sus coeficientes.

Dado que el transporte sólido es proporcional a la velocidad, se podrá encontrar una función $V_q(x)$, a partir de la distribución de velocidades, de forma que la distribución del transporte sea $Q(x) = \int_0^x Q_0 \cdot V_q(x) dx$, siendo Q_0 el transporte sólido longitudinal neto a través de la sección considerada.

Sea ahora $V_q(x) = k \cdot V(x)$. De la definición y del propio concepto físico de transporte sólido, se desprenden varias propiedades que debe cumplir la función $V_q(x)$:

a) **El área bajo ella encerrada debe ser igual a la unidad.** Para ello debe encontrarse un factor normalizador igual al valor de la integral de la función $V(x)$. De la propia definición de la distribución transversal, se tiene

$$Q = \int_0^\infty Q_0 V_q(x) dx = Q_0 \int_0^\infty V_q(x) dx \rightarrow \int_0^\infty V_q(x) dx = 1$$

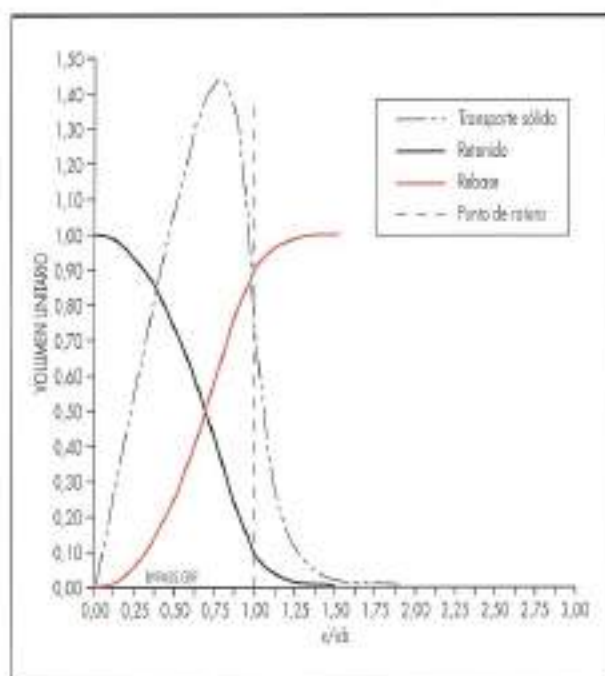


FIGURA 3.5. Curvas de distribución de volúmenes.

pues $Q = Q_0$, como antes se ha dicho. Esto nos permitirá encontrar el valor del factor k , que deberá cumplir

$$k = \int_0^\infty V(x) dx, \text{ es decir } V_q(x) = \frac{V(x)}{\int_0^\infty V(x) dx}. \text{ La figura 3.2}$$

indica la variabilidad de $\int_0^\infty V(x) dx$ con P , observándose

que se sitúa en torno a 0.50. Un ajuste lineal mínimo cuadrático da como resultado que $\Omega = 0.499028 - 0.229367 \cdot P$, siendo Ω el valor de la integral. Un valor de P en torno a 0.02, bastante usual, evalúa esta integral en

$$0.50. \text{ Por tanto, se obtiene } V_q(x) = \frac{V(x)}{0.499 - 0.229 \cdot P}, 0,$$

admitiendo la citada simplificación, $V_q(x) = 2 \cdot V(x)$. Las figuras 3.3 y 3.4 muestran, respectivamente, las curvas de velocidad y la propuesta de caudales para diversos valores de P .

b) **Debe ser continua.** Cada función parcial lo es, por ser combinación de funciones continuas. El único punto singular puede encontrarse en $X = 1$. La continuidad en este punto es fácilmente comprobable, dado que, siendo

$$V_{q1} = \frac{A}{k} \left(1 + \frac{p_2 - 1}{p_1 - p_2} \right) \text{ y } V_{q2} = \frac{p_2 - 1}{p_1 - p_2} \frac{A}{k}, \text{ es evidente que } V_{q1} = V_{q2}.$$

c) **Su derivada debe ser continua.** Por las mismas razones anteriores, el punto singular puede encontrarse en $X = 1$. El valor de las derivadas a uno y otro lado del punto

$$\text{singular son: } \left[\frac{dV_q}{dX} \right]_{X=1-} = \frac{A}{k} \left(1 + p_1 \frac{p_2 - 1}{p_1 - p_2} \right) \text{ por la}$$

$$\text{izquierda, y } \left[\frac{dV_q}{dX} \right]_{X=1+} = \frac{A}{k} \cdot p_2 \cdot \frac{p_2 - 1}{p_1 - p_2}, \text{ por la derecha.}$$

cha. Es inmediatamente comprobable como ambos valores coinciden.

3.1. VOLUMEN DE BY-PASS

Un punto importante donde el cálculo de la distribución transversal del transporte proporciona una ventaja notable es, como se ha indicado anteriormente, la evaluación aproximada del volumen de material sólido susceptible de rebasar un espigón u otro obstáculo. Para ello se necesita realizar la curva de *by-pass*.

Una vez calculada la curva de distribución de transporte sólido, es evidente que el volumen retenido por el espigón (cuyo morro se encuentra situado a una distancia x de la línea de orilla), $VR(x)$, sería:

$$VR(x) = \int_0^x Q_s V_s(x) dx$$

La curva de *by-pass*, $BP(x)$, es inmediata, dado que se trata del volumen no retenido ($Q_s - VR$), se tendrá:

$$BP(x) = Q_s \left[1 - \int_0^x V_s(x) dx \right]$$

En ambas expresiones, x es la coordenada del morro del espigón. La figura 3.5 muestra el aspecto de ambas curvas para un valor $P = 0.02$.

3.2. SUMA DE SEMI-ONDAS

Se propone el método de la *suma de semi-ondas* con objeto de acercar algo más a la realidad el proceso antes desarrollado.

Dado que el cálculo del transporte sólido longitudinal, según lo aquí expuesto, se realiza temporal a temporal, y que cada uno tendrá diferente punto de rotura, se introduce un error significativo.

El método que se propone para obviar minimizar este problema es el de la suma de semi-ondas. La denominación del método propuesto procede de considerar como una semi-onda la distribución transversal del transporte sólido.

Consiste en lo siguiente:

- Transformar la abscisa normalizada, X , en abscisa real de longitud transversal de playas, x . Esto implica un punto de rotura diferente para cada combinación de altura de ola y período.
- Para cada oleaje ($H_{1/3}$, T), multiplicar la función de distribución unitaria de transporte correspondiente por un coeficiente igual al transporte sólido por el producido.
- Sumar las diferentes distribuciones así obtenidas.

De esta manera se obtendrá una distribución transversal más acorde con la realidad.

Este proceso se esquematiza en la figura 3.6.

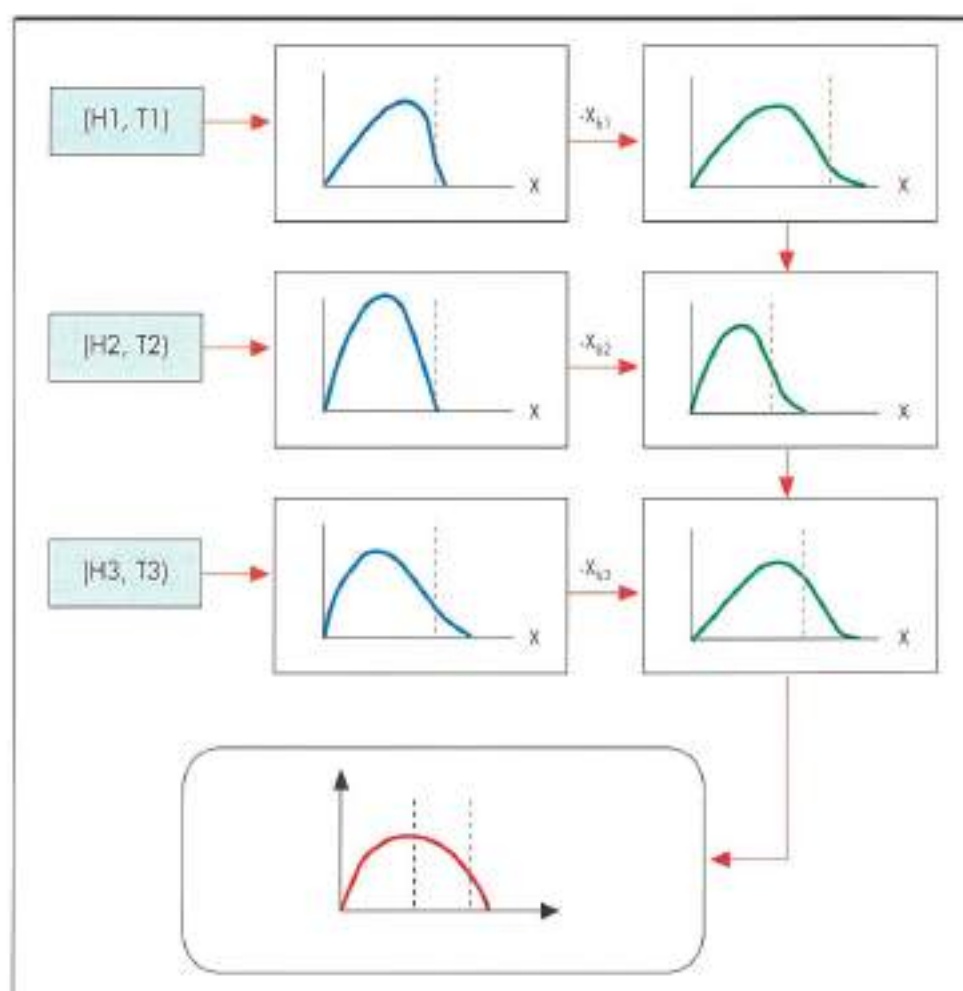


FIGURA 3.6. Esquema del proceso de suma de semi-ondas.

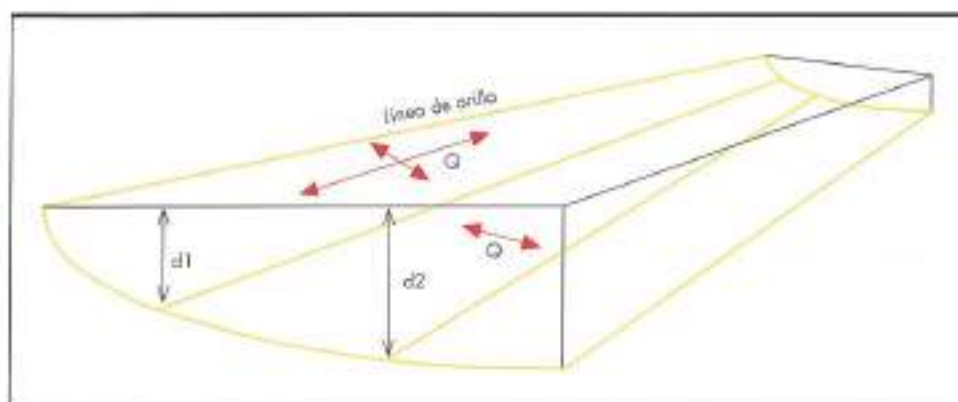


FIGURA 4.1. Zonificación del perfil de playa.

4. ZONIFICACIÓN DEL PERFIL DE PLAYA

La corriente de transporte sólido litoral se verifica únicamente en ciertas zonas del perfil de playa. Estas zonas, ilustradas en la figura 4.1, están delimitadas por dos líneas, definidas por sus profundidades:

- La zona litoral**, por encima de la profundidad activa, d_1 , en la que coexisten las corrientes de transporte sólido normal, responsable de los cambios del perfil a corto plazo, y longitudinal, que induce movimientos a medio plazo.
- La zona intermedia**, por debajo de la profundidad activa y por encima de la profundidad límite, d_2 , donde únicamente tiene lugar el transporte normal, siendo despreciable o nulo el transporte longitudinal.
- La zona offshore**, por debajo de la profundidad límite, donde el transporte sólido en cualquiera de sus manifestaciones es prácticamente nulo.

La teoría de Hallermeier (posteriormente reformada por Birkemeier, 1985), proporciona la expresión de ambas profundidades:

$$d_1 = 1.75 \cdot H_{s0.137} - 57.9 \cdot \left(\frac{H_{s0.137}^2}{gT_s^2} \right)$$

donde $H_{s0.137}$ es la altura de ola superada 12 h al año, o lo que es igual, la que es superada con una probabilidad del 0.137 %, y T_s es su período asociado.

La profundidad límite se calcula mediante una fórmula recurrente:

$$\frac{2\pi d_2}{L} = \text{arc sinh} \left(\frac{\pi H_{s50}}{T_{s0} \sqrt{8\Delta D_{s0}}} \right)$$

en la cual L es la longitud de onda asociada a la profundidad d_2 (lo que implica la característica de recurrencia de la expresión); H_{s50} es la altura de ola significativa que presenta una probabilidad del 50% de ser superada, T_{s0} , su período

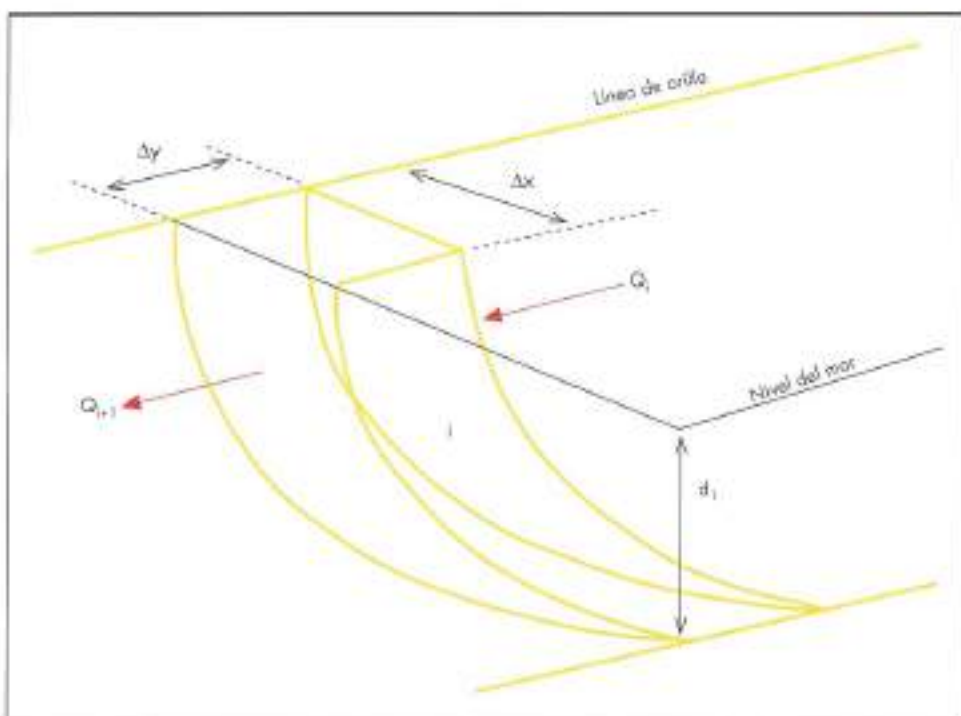


FIGURA 5.1. Celda de playa.

asociado, Δ , la densidad relativa de la arena respecto del agua del mar (=1.6), y D_{50} , el tamaño medio de la arena.

5. ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

La ecuación de continuidad se basa en la conservación del material sólido que se mueve a través de una celda de playa. Es preciso conocer los datos siguientes:

- a) La profundidad activa de la playa, d_1 , (aquella a partir de la cual no existen cambios apreciables en el perfil en una plazo razonable), a través de la teoría de Hallermeier, o mejor aún, de campañas batimétricas sucesivas.
- b) El movimiento hiperanual en dirección normal a la orilla, Δx , proporcionado por las campañas batimétricas y/o de evolución de la línea de orilla.
- c) La separación temporal, Δt , entre campañas sucesivas.
- d) La porosidad, n , del material que compone la playa.

Así, la tasa de transporte sólido dQ/dt , será obtenida como función del movimiento de la línea de orilla.

La variación de la posición de la línea de orilla, δx , producirá una variación δV del volumen de sedimentos contenidos en el perfil, que vendrá dado por:

$$\delta V = \delta x \cdot \delta y \cdot d_1 \cdot (1 - n)$$

Por otra parte, se tiene:

$$\delta Q = \delta V / \delta t$$

Igualando ambas expresiones y pasando a diferenciales se obtiene:

$$\frac{dQ}{dy} = \frac{dx}{dt} d_1 (1 - n)$$

que es la ecuación de continuidad, que permite relacionar la derivada de la corriente de transporte sólido con los movimientos de la línea de orilla.

Existen ahora dos vertientes según las cuales puede emplearse esta expresión.

5.1. EVALUACIÓN DE LA LÍNEA DE ORILLA

El problema más común derivado de la aplicación de la ecuación de continuidad estriba en predecir el movimiento de la línea de orilla. Para ello, conocido el transporte sólido a lo largo de la costa, se entra en la ecuación de continuidad, despejada convenientemente:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{L_x d_1 (1 - n)}$$

donde $\Delta x/\Delta t$ representa el movimiento total de la línea de orilla en el período de tiempo Δt a que se refieren los datos de transporte sólido (generalmente un año). El signo de ΔQ determinará el sentido del movimiento (acrecivo o erosivo) de la línea de orilla. Este es el fundamento de los modelos matemáticos de evolución en planta.

5.2. TRANSPORTE SÓLIDO REAL EN FUNCIÓN DEL MOVIMIENTO DE LA LÍNEA DE ORILLA

Al integrar la ecuación de continuidad, se obtendrá la diferencia de transporte sólido entrante y saliente de la celda considerada.

Si se integra en diferencias finitas la expresión anterior, limitando a los lados de cada celda, se tendrá:

$$Q_{i+1} = Q_i + \frac{\Delta x}{\Delta t} L_x d_1 (1 - n)$$

donde L_x es la longitud de la celda.

De esta forma se tienen n ecuaciones con $n+1$ incógnitas. Evidentemente, n es el número de celdas considerada. La incógnita adicional se obtiene mediante las condiciones de contorno correspondientes (transporte sólido conocido en los bordes).

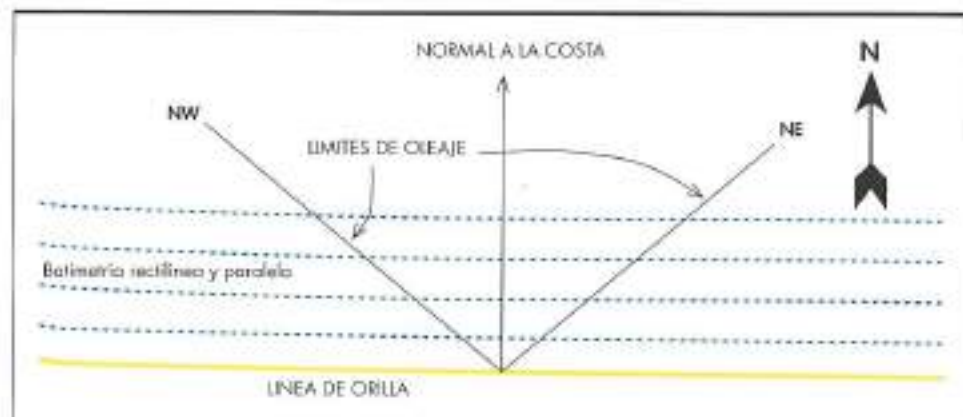
La ecuación de continuidad constituye el fundamento de los modelos matemáticos de evolución del perfil de playa, dado que, conocida la variación de flujo de arena a lo largo de una alineación costera, puede predecirse su evolución futura.

5.3. COMENTARIOS

Algunos autores prefieren utilizar el concepto de *profundidad límite*, es decir, aquella por debajo de la cual el transporte sólido es despreciable o nulo en cualquiera de sus manifestaciones. O bien, una profundidad media entre la activa y la límite.

Teniendo en cuenta que los movimientos de la línea de orilla a medio plazo, que implican transferencia de material sólido a lo largo de la playa (y por tanto, variación de volumen en las celdas), son debidos principalmente al transporte longitudinal, parece lógico utilizar la profundidad activa, que limita la zona en que se verifica este tipo de transporte.

FIGURA 7.2. Tramo de playa en estudio. Secciónes que le afectan.



6. MOVIMIENTOS HISTÓRICOS DE LA LÍNEA DE ORILLA

La base de datos histórica del CEPYC presenta reconstituciones de la línea de orilla correspondientes a la práctica totalidad de las costas españolas mediterránea y andaluza-atlántica, desde el año 1946.

Estos datos se encuentran en forma numérica (tablas de doble entrada) y gráfica (planos de evolución).

7. EJEMPLOS TEÓRICOS DE APLICACIÓN

7.1. EJEMPLO 1

A continuación se expone un ejemplo de aplicación sencillo, con ánimo de fijar ideas. Sea el tramo de costa definido en la figura 7.1, en el que se desea calcular las tasas de transporte sólido longitudinal bruto y neto a lo largo de un año.

Los sectores que afectan a la playa son los comprendidos entre el NW y el NE, es decir: 1/2 NW, N y 1/2 NE. Con ánimo de simplificar, se han tomado sólo tres sectores. Sin embargo, el cálculo con muchos más se efectuaría de la misma forma.

Las observaciones visuales de oleaje proporcionan una tabla de doble entrada con un total de 500 observaciones y 45 calmas. Por tanto, el cálculo de la frecuencia de presentación habrá de hacerse en base a este número: es decir, si un oleaje propagándose desde la dirección norte se ha presentado 25 veces, su frecuencia será $f = 25/(500 + 45) = 4.59\%$.

La tabla 7.1 presenta los datos de oleaje y el cálculo de frecuencias. Sólo se incluyen los sectores que afectan a la costa. En ella, los sectores NW y NE afectan sólo en la mitad, dado que sus bisectrices constituyen los límites de oleaje. Por tanto, las cifras que indican número de observaciones se consideran reducidas a la mitad (v. gr.: si se han observado $n = 20$ temporales procedentes del NE con $H_{1/3} = 0.50$ m se consideran $n = 10$, etc.).

La figura 7.2 muestra la distribución de frecuencias de los tres sectores considerados.

En base a lo calculado en la tabla 7.2, se aplica la expresión del transporte sólido, que como recordará es:

$$Q_{L+1} = Q_L + \frac{\Delta x}{\Delta t} L_c d_L (1 - n)$$

$H_{1/3}$	NE		N		NW	
	n	f	n	f	n	f
0.50	10.00	0.01835	140.00	0.25688	35.00	0.06422
1.00	8.00	0.01468	80.00	0.14679	28.00	0.05138
1.50	5.00	0.00917	65.00	0.11927	15.00	0.02752
2.00	1.00	0.00183	50.00	0.09174	5.00	0.00917
2.50	0.00	0.00000	38.00	0.06972	2.00	0.00367
3.00	1.00	0.00183	25.00	0.04587	0.00	0.00000
TOTAL	25.00	0.04587	398.00	0.73028	83.00	0.15596

TABLA 7.1. Observaciones y cálculo de frecuencias de sectores que afectan a la costa.

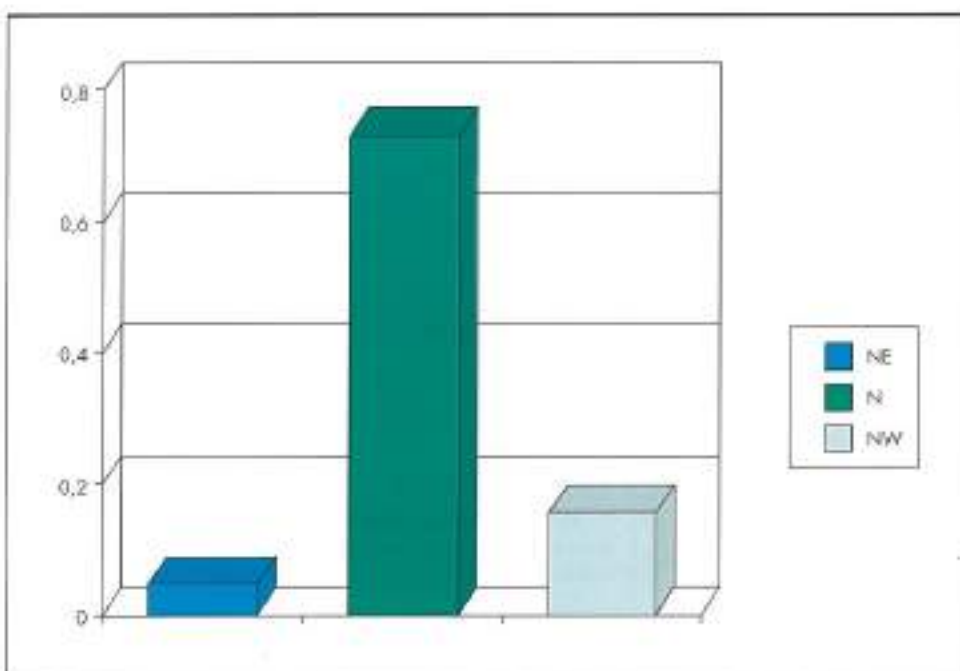


FIGURA 7.2. Distribución de frecuencias de los sectores que afectan a la costa.

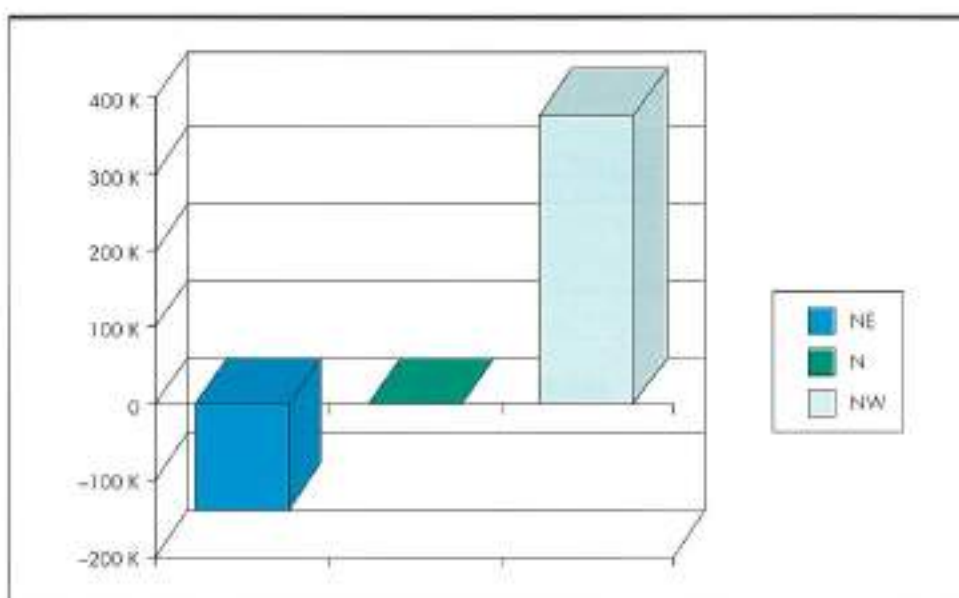
TABLA 7.2. Función angular.

SECTOR	θ_1		θ_2		F' (B)
	ANGULO	COSENO ^{3/4}	ANGULO	COSENO ^{3/4}	
NW	-45.00	0.46	-22.50	0.83	0.37
N	-22.50	0.83	22.50	0.83	0.00
NE	22.50	0.83	45.00	0.46	-0.37

TABLA 7.3. Cálculo del transporte sólido.

H/A	NE	N	NW
	Q	Q	Q
0.50	-5408.15	0.00	18927.05
1.00	-24474.50	0.00	85660.74
1.50	-42129.39	0.00	126434.12
2.00	-17258.93	0.00	86483.26
2.50	0.00	0.00	60464.96
3.00	-47560.01	0.00	0.00
TOTAL	-136831.00	0.00	377970.12
TRANSPORTE NETO			241139.12

FIGURA 7.3. Distribución del transporte sólido bruto [por sectores].



donde se ha hecho $F'(\theta) = \cos^{3/4} \theta_2 - \cos^{3/4} \theta_1$.

Así se tendrá, para cada sector (tabla 7.3).

El resultado indica un transporte sólido neto en sentido W $\rightarrow$ E de un valor de 241.139 m³/año. El sector centrado en el N no contribuye al transporte en el cálculo. Se ha introducido un error que podría haberse minimizado eligiendo un tamaño de sector menor.

7.2. EJEMPLO 2

Sea ahora el tramo de costa indicado en la figura 7.4.

Se efectúan los cálculos anteriormente citados, con los datos de oleaje que proporciona, por ejemplo, el banco de datos de observaciones visuales o un boyá.

En este caso se ha automatizado el proceso mediante una hoja electrónica, obteniendo los resultados que se indican a continuación.

El transporte sólido queda, por tanto (tabla 7.4). Es decir, se tiene una capacidad de transporte sólido en sentido N- >, del orden de 195.000 m³/año, debido a oblicuidad del oleaje en rotura.

del orden de 195.000 m³/año, debido a oblicuidad del oleaje en rotura.

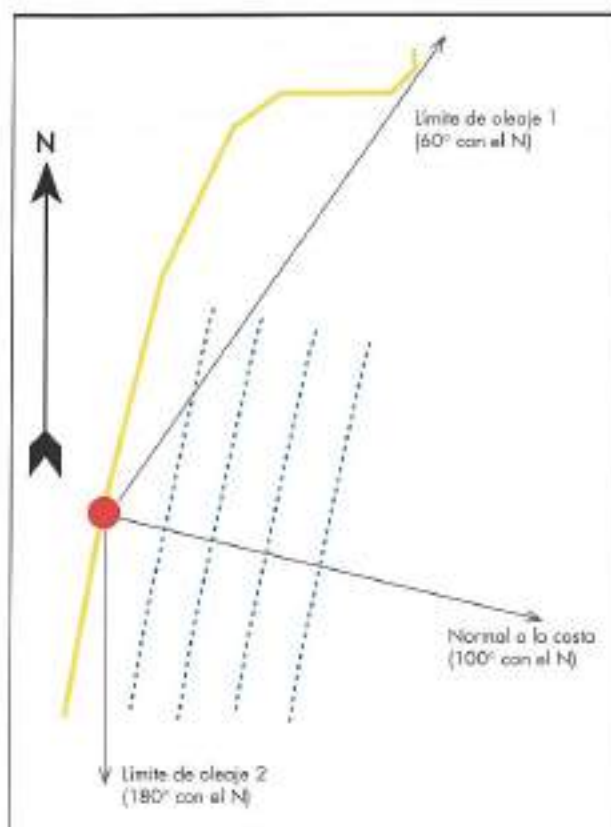


FIGURA 7.4. Tramo de costa en estudio.

SECTOR	FRECUENCIA	TRANSPORTE
ENE	0,113304	245482,04
E	0,200868	176298,35
ESE	0,055076	-79589,45
SE	0,027986	-80116,18
SSE	0,016338	-57432,37
S	0,019693	-11313,92
TRANSPORTE NETO:		193328,47

TABLA 7.4. Resultados del cálculo del transporte sólido.

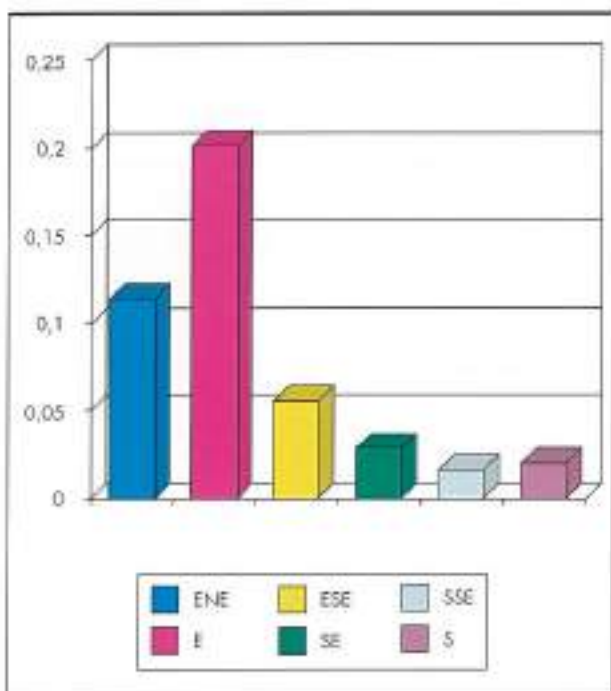


FIGURA 7.5. Frecuencias de presentación de los sectores.

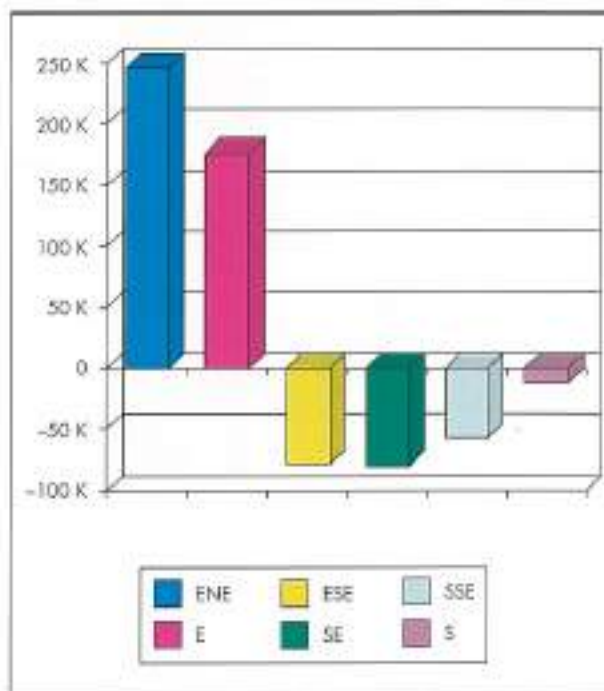


FIGURA 7.6. Transporte sólido bruto en m³/año.

Cálculo del transporte sólido.

SECTOR ENE 69,375								
ALFA 1	ALFA 2	NORMAL	TOT DATOS	F SECTOR	COS A'1	COS A'2	DIF(ALFA)	F(ALFA)
60	78,75	100	1117	0,113303	0,7660448	0,932008	-18,75	0,93043
ALFA'1	ALFA'2	%	$\wedge(9/4)$ $\wedge(9/4)$ DIF 0,5489994 0,853482 -0,30448					
40	21,25	0,83						
H	N	N'	F	H^2.5	Q			
0,00	23,29	19,33	0,0173	0,00	0,00			
0,50	49,38	40,99	0,0367	0,18	10977,85			
1,00	30,63	25,42	0,0228	1,00	38520,17			
1,50	8,75	7,26	0,0062	2,76	30323,37			
2,00	8,00	6,64	0,0059	5,66	56912,31			
2,50	2,63	2,18	0,0020	9,88	32684,89			
3,00	3,88	3,22	0,0029	15,59	76063,46			
SUMA	126,36				245482,04			
SECTOR E 90								
ALFA 1	ALFA 2	NORMAL	TOT DATOS	F SECTOR	COS A'1	COS A'2	DIF(ALFA)	F(ALFA)
78,75	101,25	100	1117	0,200868	0,932008	0,999762	-22,5	0,371743
ALFA'1	ALFA'2	%	$\wedge(9/4)$ $\wedge(9/4)$ DIF 0,8534816 0,999465 -0,14598					
21,25	-1,25	1						
H	N	N'	F	H^2.5	Q			
0,00	41,85	41,85	0,0375	0,00	0,00			
0,50	82,38	82,38	0,0738	0,18	8815,85			
1,00	54,38	54,38	0,0487	1,00	32920,13			
1,50	23,63	23,63	0,0212	2,76	39419,78			
2,00	16,25	16,25	0,0145	5,66	55648,15			
2,50	4,63	4,63	0,0041	9,88	27698,32			
3,00	1,25	1,25	0,0011	15,59	11796,02			
SUMA	224,37				176298,35			
SECTOR ESE 112,5								
ALFA 1	ALFA 2	NORMAL	TOT DATOS	F SECTOR	COS A'1	COS A'2	DIF(ALFA)	F(ALFA)
101,25	123,75	100	1117	0,055076	0,999762	0,915312	-22,5	0,45837
ALFA'1	ALFA'2	%	$\wedge(9/4)$ $\wedge(9/4)$ DIF 0,9994646 0,819465 -0,18					
-1,25	-23,75	1						
H	N	N'	F	H^2.5	Q			
0,00	11,51	11,51	0,0103	0,00	0,00			
0,50	20,88	20,88	0,0187	0,18	-2755,17			
1,00	13,00	13,00	0,0116	1,00	-9703,67			
1,50	7,88	7,88	0,0071	2,76	-16208,66			
2,00	4,50	4,50	0,0040	5,66	-19001,16			
2,50	2,75	2,75	0,0025	9,88	-20285,02			
3,00	1,00	1,00	0,0009	15,59	-11635,79			
SUMA	61,52				-79589,45			

Cálculo del transporte sólido.

SECTOR SE 135								
ALFA 1	ALFA 2	NORMAL	TOT DATOS	F SECTOR	COS A'1	COS A'2	DIF(ALFA)	F(ALFA)
123,75	146,25	100	1117	0,027986	0,9153116	0,691514	-22,5	-0,97632
ALFA'1	ALFA'2	%	^19/4 ^19/4 DIF 0,8194646 0,436065 0,383399					
-23,75	-46,25	1						
H	N	N'	F	H*2,5	Q			
0,00	5,75	5,75	0,0051	0,00	0,00			
0,50	7,75	7,75	0,0069	0,18	-2178,20			
1,00	10,63	10,63	0,0095	1,00	-16900,69			
1,50	4,50	4,50	0,0040	2,76	-19715,69			
2,00	0,00	0,00	0,0000	5,66	0,00			
2,50	2,63	2,63	0,0024	9,88	-41321,59			
3,00	0,00	0,00	0,0000	15,59	0,00			
SUMA	31,26				-80116,18			
SECTOR SSE 157,5								
ALFA 1	ALFA 2	NORMAL	TOT DATOS	F SECTOR	COS A'1	COS A'2	DIF(ALFA)	F(ALFA)
146,25	168,75	100	1117	0,016338	0,6915135	0,362439	-22,5	-0,85088
ALFA'1	ALFA'2	%	^19/4 ^19/4 DIF 0,4360653 0,101924 0,334141					
-46,25	-68,75	1						
H	N	N'	F	H*2,5	Q			
0,00	3,36	3,36	0,0030	0,00	0,00			
0,50	5,88	5,88	0,0053	0,18	-1440,30			
1,00	1,63	1,63	0,0015	1,00	-2258,59			
1,50	5,00	5,00	0,0045	2,76	-19091,84			
2,00	1,00	1,00	0,0009	5,66	-7838,35			
2,50	0,38	0,38	0,0003	9,88	-5203,35			
3,00	1,00	1,00	0,0009	15,59	-21599,95			
SUMA	18,25				-57432,37			
SECTOR S 174,375								
ALFA 1	ALFA 2	NORMAL	TOT DATOS	F SECTOR	COS A'1	COS A'2	DIF(ALFA)	F(ALFA)
168,75	180	100	1117	0,019893	0,362439	0,173649	-11,25	-0,41996
ALFA'1	ALFA'2	%	^19/4 ^19/4 DIF 0,1019245 0,019465 0,082459					
-68,75	-80	1						
H	N	N'	F	H*2,5	Q			
0,00	4,09	4,09	0,0037	0,00	0,00			
0,50	10,25	10,25	0,0092	0,18	-1239,19			
1,00	5,63	5,63	0,0050	1,00	-3850,32			
1,50	1,25	1,25	0,0011	2,76	-2355,73			
2,00	1,00	1,00	0,0009	5,66	-3868,68			
2,50	0,00	0,00	0,0000	9,88	0,00			
3,00	0,00	0,00	0,0000	15,59	0,00			
SUMA	22,22				-11313,92			

8. SIMBOLOGÍA EMPLEADA

8.1. CARACTERES LATINOS

8.1.1. Mayúsculas

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	UNIDADES
A	Parámetro, función de P	
B ₁	Parámetro, función de P	
B ₂	Parámetro, función de P	
BP(X)	Curva de distribución del caudal sólido que rebasa un espigón	m ³ /año
C	Coefficiente de fricción con el fondo	
C _T	Coefficiente de período	
[C ₁ , C ₂]	Intervalo en que C _T se encuentra contenido	
D ₅₀	Tamaño medio del sedimento	mm
(EC ₅₀)	Flujo de energía	
F(θ)	Función de direccionalidad	
H ₀	Altura de ola significativa en rotura	m
H _r	Altura de ola significativa de cálculo	m
H ₀	Altura de ola significativa en profundidades indefinidas	m
H _{0,12T}	Altura de ola significativa superada 12 horas al año	m
H _{0,50}	Altura de ola significativa superada con una probabilidad del 50%	m
K	Constante	
K _c	Coefficiente de Komar e Inman para el transporte sólido	
L	Longitud de onda	m
L _c	Longitud de celda de playa, en la ecuación de continuidad	m
N	Constante para el calibrado de P	
P	Parámetro de Longuet-Higgins	
Q	Caudal de transporte sólido longitudinal	m ³ /año
Q(x)	Función de distribución transversal del caudal de transporte sólido	m ³ /año
Q _t	Valor total del transporte sólido	m ³ /año
T	Período de oleaje	s
[T ₁ , T ₂]	Intervalo en que se encuentra el período esperado	s
T _a	Período asociado a H _{0,12T}	s
T ₅₀	Período asociado a H _{0,50}	s
V	Volumen de sedimentos	m ³
V(X)	Función de distribución de la velocidad longitudinal	
V _u (x)	Función de distribución normalizada de la corriente de transporte sólido longitudinal unitaria	
VR(x)	Curva de distribución del caudal sólido que retiene un espigón	m ³ /año
X	Coordenada normalizada, perpendicular a la orilla	x/x ₀

8.1.2. Minúsculas

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	UNIDADES
d ₁	Profundidad activa del perfil de playa	m
d ₂	Profundidad límite del perfil de playa	m
f	Frecuencia unitaria de presentación de un oleaje	H _z
f _s	Frecuencia unitaria de presentación de un sector	H _z
f _u	Frecuencia unitaria de presentación de la porción útil de un sector dividido por límites de oleaje	H _z
g	Aceleración de la gravedad (= 9.81)	m/s ²
k	Factor de proporcionalidad entre V(x) y V _u (x)	
p ₁	Factor de la distribución transversal de velocidad longitudinal	
p ₂	Factor de la distribución transversal de velocidad longitudinal	
t	Tiempo transcurrido	s
x	Coordenada normal a la orilla	m
x ₀	Coordenada normal a la orilla, del punto de rotura	m
y	Coordenada longitudinal (paralela a la orilla)	m

8.2. CARACTERES GRIEGOS

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	UNIDADES
α°	Expresa un ángulo, en general	°
α	Constante empírica en el parámetro P, de valor aproximado 0.01	
tgβ	Pendiente de la playa	
Δx	Movimiento de la línea de orilla paralelamente a sí misma	m
δ	Símbolo que indica variación	
θ ₁	Oblicuidad del oleaje en rotura	°
θ ₂	Oblicuidad del oleaje en profundidades indefinidas	°
Ω	Área encerrada por la curva de distribución de velocidades	

9. SEGUNDA PARTE

En una segunda parte se abordará el estudio del transporte sólido en el Delta del Llobregat (Barcelona), utilizando la fórmula del CERC y la ecuación de continuidad.

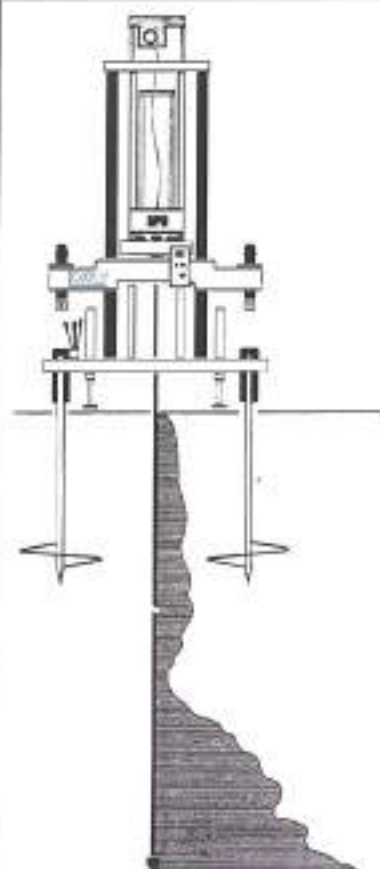
10. AGRADECIMIENTOS

Han sido de gran ayuda las conversaciones mantenidas con D. Antonio Lachuga Alvaro, Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos y Jefe del Sector de Costas del Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEPYC) del CEDEX referentes a la integración de la fórmula del CERC.

Se agradece igualmente la colaboración prestada por D. José Santos López Gutiérrez, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos de la Fundación Agustín de Betancourt.

11. BIBLIOGRAFÍA

- 1) Bretschneider: *Field investigations of wave energy loss of shallow water ocean waves*. U.S. Army beach erosion board. Tech. Mem. 46, 1954.
- 2) Coastal engineering research center: *Shore Protection Manual*. Virginia (EE.UU.), 1977.
- 3) Fredsoe, J.; Deigaard, R.: *Mechanics of coastal sediment transport*. World Scientific. Singapur, 1992.
- 4) Galvin & Eagleson: *Experimental study of longshore currents on a plane beach*. U.S. Army Coastal Engineering Research Center (CERC). Tech. Mem. 10, 1965.
- 5) Horikawa, K.: *Nearshore dynamics and coastal processes*. University of Tokyo press, 1988.
- 6) Lachuga Alvaro, A.: *Dinámica litoral y morfología de playas*. Ingeniería Civil, n.º 70, 95-107. CEDEX, 1989.
- 7) Longuet-Higgins, M. S.: *Recent progress on the study of longshore currents*. Waves on beaches and resulting sediment transport: Publication n.º 28 of the Mathematics Research Center of the University of Wisconsin. Academic Press, London, 1972.
- 8) Meyer, R. E.: *Note on wave run-up*. Journal of Geophysical Research, 75; 687-690, 1969.
- 9) Meyer, R. E. (Editor): *Waves on beaches and resulting sediment transport*. Academic Press. London, 1972.
- 10) Medina Villaverde, J. M.: *Dinámica litoral del Delta del Llobregat*. Centro de Estudios de Puertos y Costas. Madrid, 1994.
- 11) Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente: *Recomendaciones para Obras Marítimas. Oleaje*.
- 12) Prandtl: *Essentials of fluid dynamics*. Haffner, New York, 1952.

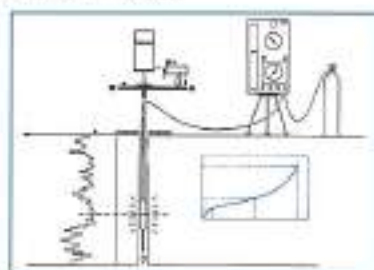
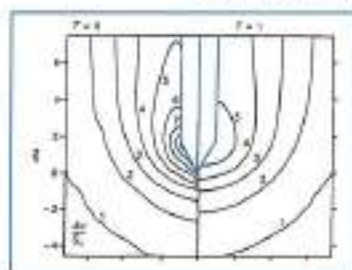


IGEOTest

LABORATORIO ACREDITADO

ENSAYOS GEOTÉCNICOS IN SITU · CONTROL DE TRATAMIENTOS DEL TERRENO

- Penetrómetro Dinámico DPH, DPL, Borros.
- Penetrómetro Estático CPT.
- Píezómetro CPTU.
- Píezómetros MPIM, PDP.
- Píezómetro autoperforante SBP.
- Dilatómetro Marchetti DMT.
- Vane Test y Vane Borei FV.
- Geofísica: Sísmica y Eléctrica.
- Caracterización de suelos contaminados.



Plaça Curifidors, s/n - Apartado Correus 72 - 17480 Castell d'Empúries, Girona - T.E. (972) 25-0527 - (908) 43-0117

PLAN DE BALSAS DE TENERIFE



CABILDO INSULAR DE TENERIFE
GOBIERNO DE CANARIAS
CONSEJERIA DE OBRAS PUBLICAS, VIVIENDA Y AGUAS
CONSEJERIA DE AGRICULTURA Y PESCA



Balsa de Montaña de Taco.

BALSA	ALTURA DE AGUA (m)	CAPACIDAD (m³)	SUPERFICIE IMPERMEABILIZADA (m²)	MATERIAL GEOMEMBRANA
Montaña de Taco	13,70	821.700	37.600	P.V.C.
Buen paso	16,00	154.800	20.900	P.E.A.D.
La Florida	14,25	161.800	14.500	P.V.C.
La Taberna	14,50	149.200	18.700	P.V.C.
Valles de Mesa	13,00	176.000	25.800	P.V.C.
La Cruz Santa	16,00	664.700	61.400	P.V.C.
Barranco de Benijos	16,00	206.400	23.800	P.V.C.
San Antonio	11,00	157.000	22.900	P.V.C.
Valle Molina	13,00	614.400	71.800	P.V.C.
El Baquerán	10,50	51.700	9.600	E.P.D.M.
San Isidro	10,50	49.800	8.900	P.E.A.D.
Valle San Lorenzo	16,00	250.600	27.800	P.E.A.D.
SUMAN		3.458.100	343.700	

EXPLOTA:



ORGANISMO AUTONOMO LOCAL
BALSAS DE TENERIFE