

Método para la estimación del transporte longitudinal de sedimentos en playas de arena

Ronnie Torres Hugues

Correo electrónico: ronnie@cih.cujae.edu.cu

Luis Córdova López

Correo electrónico: cordova@tesla.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

Resumen

Las playas se encuentran en una delicada situación a nivel mundial debido a su constante erosión por la acción del cambio climático global. Por lo que se hace necesario contar con herramientas que permiten obtener soluciones eficientes y eficaces desde el punto de vista funcional y económico. Se propone una metodología basada en modelos internacionales utilizados para estimar la magnitud y dirección del transporte de sedimentos litoral utilizando información de campo de la playa de Varadero, Matanzas, Cuba y una porción de la costa de New Jersey, EUA. Se realiza la calibración del mismo. El método que se expone propone utilizar la fórmula de Longuet-Higgins de velocidad en la fórmula de Bijker's para la distribución del transporte de sedimentos longitudinal. Aunque para esto se requiere de los valores a la entrada de la zona de rompiente, que se resuelve según la metodología planteada en el Coastal Engineering del año 2000 de la Universidad de Delft.

Palabras clave: transporte de sedimentos longitudinal, playas de arena, Varadero, distribución transversal, Bijker

Recibido: septiembre 2009

Aprobado: octubre 2009

Publicado: *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, Vol XXVII, No. 3, 2006

INTRODUCCIÓN

El conocimiento del comportamiento del movimiento del transporte de sedimentos permite, en primer lugar, predecir en el tiempo la variación de la línea de costa para diseñar espigones y buscar la estabilidad de la playa, conocer el área de arena-sol con que se contará en una cantidad de años, determinada para posteriores fines turísticos y, por último, construir playas artificiales.

La ingeniería costera se subdivide en tres categorías: puertos, morfología y *offshore*. Siendo el campo de la morfología el más extenso y el que interviene en los demás. En la morfología costera se estudia la interacción entre el oleaje, la corriente y la costa, lo cual provoca un movimiento

de la arena (transporte de sedimentos) y eventualmente cambios en la costa. El transporte de sedimentos puede ser longitudinal y transversal.

TRANSPORTE LONGITUDINAL DE SEDIMENTOS

El transporte de sedimentos longitudinal es la corriente de transporte que está constituida por el material (generalmente arena), que se mueve a lo largo de la costa, debido principalmente a la acción del oleaje.

Transporte de sólido bruto: Incluye tanto el transporte en una dirección como en la opuesta, a lo largo del período de medida, debido a las condiciones cambiantes de temporales.

Transporte longitudinal neto: Indica la diferencia de volúmenes moviéndose en uno u otro sentido: es la resultante de transporte de sedimentos longitudinal, y el principal responsable de la evolución de las playas [1].

El transporte de sedimentos longitudinal tiene como característica que el material movido generalmente no regresa al mismo punto de partida. Tiene lugar en la zona de rompiente [2].

DISTRIBUCIÓN TRANSVERSAL DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

• Importancia de la determinación de la distribución transversal del transporte de sedimentos

La corriente de transporte de sedimentos longitudinal presenta una distribución transversal no uniforme, con un máximo en las proximidades del punto de rotura [1].

Entre las muchas utilidades que presenta el conocimiento de la distribución transversal de este transporte, se puede citar: que permite dimensionar la longitud de un espigón diseñado, por ejemplo, para estabilizar una playa, en cuanto a su capacidad de retención de arenas a sotamar, obteniendo, asimismo, el volumen de by-pass para una longitud determinada.

• Método de Bijker

La fórmula de Bijker está basada en el concepto de $S = V_c$ (el transporte de sedimentos es igual a la velocidad por la concentración) [2].

La fórmula trata dos componentes de transporte de sedimentos, un componente es el transporte de arrastre del fondo y el otro es el transporte de partículas suspendidas. La fórmula de transporte de arrastre de fondo fue adaptada de la fórmula propuesta por Kalinske-Frijlink (para las condiciones de río). Bijker dividió dicha expresión en un parámetro de remoción y otro de transporte. Luego introduce la influencia del oleaje para modificar la tensión de cortante del fondo, $T_{c'}$, y convertirla en el parámetro de remoción T_{cw} . La parte restante, el parámetro de transporte fue adaptado simplemente despreciando el factor de olas (μ). La fórmula de transporte de fondo fue escrita como:

$$S_b = \frac{5 \cdot D50 \cdot V \cdot \sqrt{g}}{C} \cdot \exp \left[\frac{-0,27 \cdot \Delta \cdot D50 \cdot \rho g}{\mu \cdot CW} \right] \quad (1)$$

donde:

S_b : Transporte de fondo (m^3/sm).

D50: Diámetro de la partícula (μm).

V: Velocidad local (m/s).

C: Coeficiente de Chezy (adim); $C = 18 \log(12h/r)$.

h: profundidad del agua (m).

r: Rugosidad de fondo (m).

g: Aceleración de la gravedad (m/s^2).

Δ : Densidad relativa aparente del material de fondo (adim).

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$$

ρ_s : Densidad del sólido del material de fondo (kg/m^3).

ρ_w : Densidad del agua (kg/m^3).

τ_{cw} : Tensión de cortante por corriente y oleaje (N/m^2).

μ : Factor de olas (adim).

$$\mu = (C/C90) \quad (2)$$

donde:

C: Coeficiente de Chezy (adim).

$$C = 18 \log(12h/r) \quad (3)$$

C90: Coeficiente de Chezy basado en el diámetro 90 (adim).

$$C90 = 18 \log(12 h/D90) \quad (4)$$

donde:

h: Profundidad local (m).

r: Rugosidad del lecho (m).

D90: Diámetro pasante del 90 % de la muestra (μm).

Bijker asumió que el transporte de fondo ocurre en una capa de espesor igual a la rugosidad de fondo (r). La concentración se asume como constante en todo su espesor. Es expresada en unidades de volumen de sedimento depositado por unidad de volumen de agua, y por tanto, incluye los vacíos en el material depositado.

Bijker acopló la fórmula adaptada de transporte de fondo a la fórmula de transporte suspendido de Einstein. El resultado se expresa como:

$$S_s = 1,83 Q S_b \quad (5)$$

donde:

S_s : Transporte suspendido (m^3/sm).

S_b : Transporte de fondo (m^3/sm).

Q: Factor de las integrales de Einstein (adim).

Conociendo ambas formas de transporte, se obtiene el transporte total, S, sumándolas. Debido a que el transporte suspendido está directamente relacionado se puede simplificar como sigue:

$$S = S_b + S_s \quad (6)$$

$$S = S_b (1 + 1,83 Q) \quad (7)$$

La distribución del transporte de la arena a través de la zona de rompiente es encontrada calculando el transporte para varias profundidades (h), hasta la profundidad al borde exterior de la zona de rompiente (h_b).

Ventajas del método

• Con la fórmula de Bijker se resuelve cualquier problema que la fórmula de CERC pueda también.

• Es adaptable a cualquier condición de corriente.

- El concepto de la fórmula de Bijker –el ajuste de la tensión de cortante tenida en cuenta para las olas– puede tener una aplicación mucho más universal.

- Alternativamente, la velocidad (V), incluida en la fórmula de Bijker puede ser conducida por cualquier combinación de fuerzas y sujeta a toda clase de influencia local.

- La fórmula de Bijker puede ser usada para predecir la sedimentación en un canal estrecho en el cual no hay olas rompientes.

• Distribución de velocidad según Longuet-Higgins

Si se analiza una columna de agua se observa que existen fuerzas que provocan el movimiento de las aguas y fuerzas que se oponen a este. El equilibrio de estas fuerzas en la dirección a lo largo de la costa provoca una corriente constante en esa dirección. Como fuerzas que provocan el movimiento se encuentran las componentes de la tensión de cortante, las fuerzas del viento y las provocadas por la marea. Como fuerzas resistentes se encuentran la turbulencia (mecanismo de difusión horizontal) y la fuerza de fricción del fondo [2].

El efecto de las fuerzas turbulentas depende del gradiente de velocidades dV/dy . Como este es infinito en el borde exterior de la zona de rotura se puede esperar que el perfil de velocidades esté más afectado en esa región. En efecto, el traslado horizontal de momento disminuye la velocidad dentro de la porción externa de la zona de rompiente y provee la fuerza que provoca el movimiento para una velocidad en la misma dirección justo fuera de la zona de rompiente (figura 1).

Longuet-Higgins y Battjes han predicho teóricamente la distribución de velocidades obtenida incluyendo la fuerza turbulenta en un equilibrio dinámico junto con la tensión de cortante y la fricción [2].

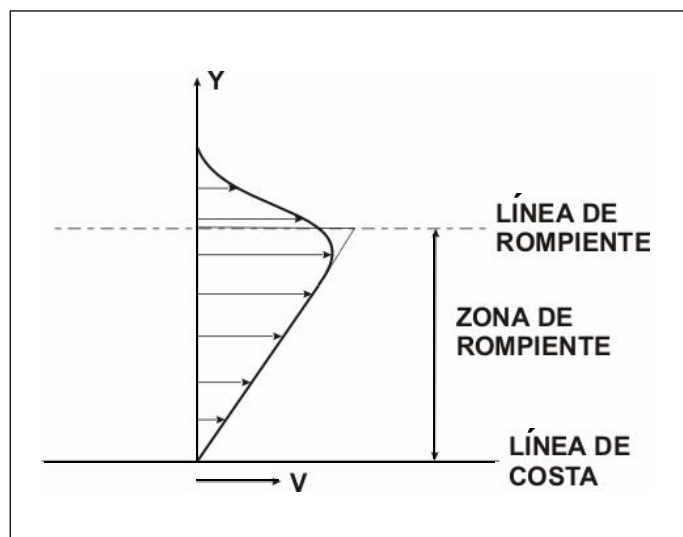


Fig. 1. Perfil de velocidad como función no lineal.

Según la teoría de Longuet-Higgins, los efectos de fricción lateral de la corriente longitudinal producen una distribución transversal no uniforme a la velocidad del flujo, con un máximo entorno a la línea de rompiente [1].

Teniendo en cuenta que las condiciones de las olas y la geometría de la orilla permanecen constantes a lo largo de la costa, estas son los componentes de fuerza que actúan en un elemento de agua mayormente [2].

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

1. Por una parte, la abscisa normalizada, $Y = y/y_b$, donde:

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

2. Por otra, el parámetro P , definido como:

$$P = \frac{\pi \tan \beta \cdot N}{2 \alpha \cdot C} \quad (8)$$

donde:

$\tan \beta$: Pendiente del fondo.

N : Constante adimensional.

α : Constante empírica cuyo valor se sitúa en torno a 0,4.

C : Coeficiente representativo de la fricción del fondo. Su valor se sitúa en torno a 0,010, según investigaciones realizadas por Prandtl, Bretschneider y Meyer.

Jhonson propone una expresión para calcular este coeficiente en términos de rugosidad relativa, Swart, reescribe esta fórmula de la siguiente manera.

$$f_w = \exp[-5,977 + 5,213(a_o/r)^{-0,194}] \quad (9)$$

donde:

a_o : Desplazamiento horizontal en el fondo (m).

r : Rugosidad del lecho (m).

$$a_o = \frac{1}{2} \frac{H}{\sinh(kh)} \quad (10)$$

donde:

H : Altura de la ola en la zona de rompiente (m).

k : Número de olas (adim).

$$k = 2\pi/\lambda \quad (11)$$

donde:

λ : Longitud de la ola (m).

$$\lambda = gh \cdot T \quad (12)$$

donde:

g : Aceleración de la gravedad (m/s^2).

h : Profundidad local del agua (m).

T : Período de la ola (sec).

El valor de N ha sido acotado superiormente por $N = 0,010$ por Galvin y Eagleson, por lo que puede tomarse este valor a falta de uno mejor.

3. Se definen también los parámetros p_1 y p_2 como:

$$p_1 = \left(-\frac{3}{4}\right) + \sqrt{\frac{9}{16} + P^{-1}} \quad (13 a)$$

$$p_2 = \left(-\frac{3}{4}\right) - \sqrt{\frac{9}{16} + P^{-1}} \quad (13 b)$$

4. A partir de ellos, los coeficientes A , B_1 y B_2 se definen como:

$$A = \frac{1}{1 - 2,5 P} \quad (14)$$

$$B_1 = \frac{p_2 - 1}{p_1 - p_2} A \quad (15)$$

$$B_2 = \frac{p_1 - 1}{p_1 - p_2} A \quad (16)$$

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

$$V(x) = AY + B_1 Y^{p_1} \quad 0 \leq Y \leq 1 \quad (17)$$

$$V(x) = B_2 Y^{p_2} \quad 1 \leq Y \leq \infty \quad (18)$$

Que debe ser calibrada con datos reales, si se dispone de ellos, debido a la incertidumbre en algunos de sus coeficientes [1].

• Parámetros en la zona de rompiente

Para obtener la altura de ola en la zona de rompiente se hace necesaria la transformación de oleaje, la cual se propone según la metodología planteada en el Coastal Engineering del año 2000 de la Universidad de Delft [2] (tabla 1).

Tabla 1 Tabla modelo para la transformación de oleaje [2]										
y	h	λ	k	c	n	ϕb	K_r	K_h	H	H_l
(m)	(m)	(m)	(-)	(m/s)	(-)	(o)	(-)	(-)	(m)	(m)
0										
10										

Para ello es imprescindible contar con datos de pendiente de la playa (m), período de la ola (T), ángulo de ataque en aguas profundas (ϕ_0), índice de rompiente (γ) y altura de ola en aguas profundas (H_0).

donde:

y: Distancia medida desde la costa al punto que se quiere analizar.

h: Profundidad del agua en el punto en cuestión.

$$h = m y \quad (19)$$

c: Celeridad de la ola en aguas poco profundas.

$$c = (gh)^{1/2} \quad (20)$$

λ : Longitud de la ola correspondiente al punto.

$$\lambda = c T \quad (21)$$

k: Número de olas.

$$k = 2\pi/\lambda \quad (22)$$

n: Relación entre la celeridad de la ola en aguas someras y aguas profundas.

$$n = \frac{c}{c_0} = \tanh(k \cdot h) \quad (23)$$

ϕb : Ángulo en la zona de rompiente.

$$\phi b = \arcsen(\sen \phi_0 \cdot n) \quad (24)$$

K_r : Coeficiente de refracción.

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos(\phi_0)}{\cos(\phi b)}} \quad (25)$$

K_s : Coeficiente de afectación debido al fondo.

$$K_{sh} = \sqrt{\frac{1}{\tanh(kh) \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)}\right)}} \quad (26)$$

H: Altura de ola transformada.

$$H = H_0 K_r K_{sh} \quad (27)$$

H_l : Altura de ola en la zona de rompiente.

$$H_l = \gamma h \quad (28)$$

Luego, donde los valores de estas dos alturas de ola coinciden ocurre el fenómeno de la rompiente de la ola. La cual antes de este fenómeno se aproxima con la altura transformada (H) y posteriormente sigue su trayectoria hacia la orilla con la altura en la zona de rompiente (H_r).

INFORMACIÓN SOBRE LAS PLAYAS

• Varadero

Varadero ocupa la parte norte de la Península de Hicacos, la cual está situada en la costa noroeste de Cuba a unos 130 km al este de Ciudad de La Habana. Con una longitud de 22 km, un ancho máximo de 500 m y una proyección de 60° de acimut. La península de Hicacos constituye la barrera material que separa los bajos fondos de la bahía de Cárdenas de las aguas del Estrecho de la Florida [3].

En un sector de aproximadamente 5 km de longitud (el llamado Varadero histórico), el perfil de la playa aparece modificado debido a la presencia de más de ciento cincuenta instalaciones turísticas cuya ubicación próxima al mar las convierte en activos agentes erosivos.³ El oleaje que afecta a la playa de Varadero proviene de los sectores correspondientes a las direcciones noreste, norte, noroeste y oeste.⁴

• New Jersey

El estado de New Jersey se encuentra situado al este de los Estados Unidos de América. Presenta fronteras con Delaware, Nueva York y Pensilvania. Su ancho máximo es de 100 km. Sus costas dan al océano Atlántico con una extensión de 225 km y su proyección es de 102° de acimut. Por lo que constituye una fuente importante de ingreso por concepto de turismo, el cual proviene de los estados vecinos no costeros y del exterior del país. Existen varias vías de transportación a este en aras de facilitar el acceso. En este sentido hay que destacar las numerosas instalaciones turísticas que predominan en el lugar, así como los centros comerciales y las edificaciones para la población de la región.

El oleaje que ataca sus costas proviene del nordeste, este, sureste y sur [5].

APLICACIÓN DEL MÉTODO

La estimación del transporte neto en Varadero se realizó con la aplicación del método de Bijker utilizando los datos de oleaje obtenidos del Global Wave Statistics (GWS) de la zona 32, donde las alturas de olas y los períodos oscilan entre 0,5 y 7,5 m y entre 3,0 y 9,5 s [6] y datos ofrecidos por los estudios realizados por el Instituto de Oceanología de Cuba. Para el caso de New Jersey se recopiló del Manual de Ingeniería Costera del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de América [5].

Las direcciones de oleaje que afectan a la playa de Varadero son oeste, noroeste, norte y noreste formando ángulos, respecto a la normal a la costa, de -60° , -15° , 30° y 75° respectivamente, siendo la dirección principal del transporte de sedimentos la proveniente del noreste hacia el suroeste. La dirección fundamental que ataca a las costas de New Jersey proviene del sureste con 33° respecto a la normal.

Los datos requeridos para aplicar la fórmula se resumen en la tabla 2.

Aplicando la suma de semiondas se determinó la distribución transversal del transporte a cada sector (en el caso de Varadero) y, luego, la distribución resultante, que se muestra en las figuras 2 y 3 [3].

Estos valores negativos indican el sentido que toma el transporte de sedimentos longitudinal resultante según el convenio establecido en el *Manual de Ingeniería Costera del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de América*, que indica que este es negativo si ocurre de derecha a izquierda y positivo de izquierda a derecha. Tomando como referencia a una persona mirando al mar.

Tabla 2 Datos generales para el método de Bijker			
Parámetro	Símbolo	Varadero	New Jersey
Acimut	$A(^{\circ})$	60	102
Diámetro del grano medio	$D_{50}(\text{mm})$	0,38	0,137
Diámetro 90	$D_{90}(\text{mm})$	0,4	0,225
Velocidad de caída	$w(\text{m/s})$	0,045 5	0,032 0
Densidad del agua	$\rho_w(\text{kg/m}^3)$	1 025	1 025
Densidad del sólido	$\rho_s(\text{kg/m}^3)$	2 700	2 660
Aceleración de la gravedad	$g(\text{m/s}^2)$	9,81	9,81
Índice de rompiente	$\gamma(\text{adim})$	0,63	0,7
Pendiente de fondo	$m(\text{adim})$	0,012	0,015
Rugosidad	$r(\text{m})$	0,05	0,05

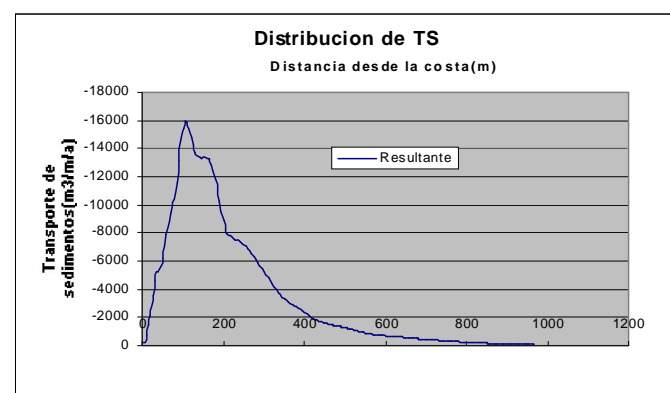


Fig. 2. Distribución transversal resultante de Bijker para el caso de Varadero.

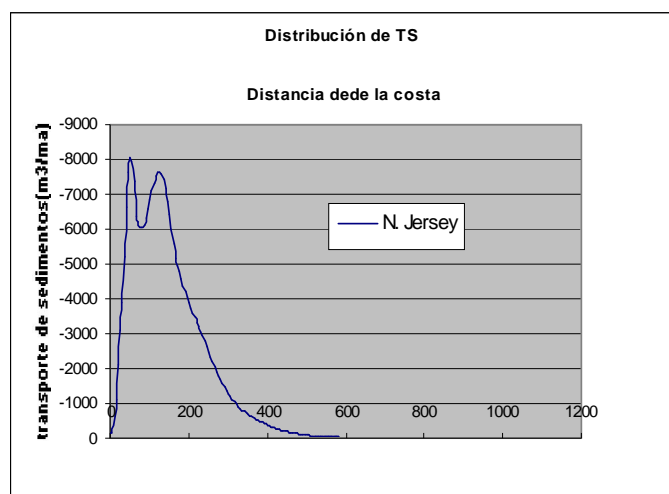


Fig. 3. Distribución transversal resultante de Bijker para el caso de New Jersey.

CALIBRACIÓN

Para calibrar este método es necesario contar con mediciones reales de campo de ambos casos de estudio. Para la playa de Varadero se contaba con perfiles comprendidos en el período de un año de treinta sectores de la playa, y se determinó el volumen de arena en este período mediante el programa de computación **Topocar** del Departamento de Procesos Costeros del Instituto de Oceanología. Esto arrojó un valor de $6,08 \cdot 10^4 \text{ m}^3$ al año. En el caso de la playa de New Jersey se contaba con los datos brindados en el *Manual de Ingeniería de costa* antes mencionado que aporta valores para la tasa de transporte de sedimentos longitudinal de $275\,000 \text{ m}^3/\text{año}$.

Como se puede apreciar existe una diferencia entre las mediciones y los cálculos, estas se compararon mediante el índice de calibración. Este índice se obtiene dividiendo el transporte de sedimentos longitudinal obtenido de las mediciones por cada resultado según corresponda al caso de estudio. Indica en qué porcentaje debe ser reducido el método. Por tanto, mientras más próximo se halle este resultado de la unidad se encontrará más cercano a la realidad. En la tabla 3 se muestran los valores de transporte de sedimentos neto y la calibración para los dos casos. El signo negativo de estos está en correspondencia con la dirección del transporte.

Tabla 3 Valores de transporte neto de sedimentos y calibración		
	Varadero ($\cdot 10^4 \text{ m}^3/\text{año}$)	New Jersey ($\cdot 10^4 \text{ m}^3/\text{año}$)
Medido	6,08	27,5
T neto	-340	-147
Calibración	0,018	0,18

CONCLUSIONES

La dirección predominante del transporte de sedimentos en Varadero es la proveniente del noreste; para el caso de New Jersey es la proveniente del sureste, demostrando la realidad del método aplicado.

La distribución del transporte de sedimentos, para ambos casos abarca una distancia máxima de 1 000 m, asociado a las alturas de olas mayores que se presentan en temporada de tormentas. La zona de mayor disipación de energía se encuentra desde la orilla hasta los 400 m, existiendo una zona de mayor intensidad hasta los 145 m, en ambos casos también.

Para futuras investigaciones y estudios en ambos escenarios se deben usar estos valores de calibración para ajustarse a la realidad.

REFERENCIAS

1. **Medina Villaverde, J. M.:** "Introducción a la evaluación del transporte sólido longitudinal neto", Revista *Ingeniería Civil*, 1997.
2. **Van Der Velden, E. T. J. M.:** *Coastal Engineering*, Delft University of Technology, Delft, 2000.
3. **Juanes, J. L.:** "La erosión de las playas de Cuba. Alternativas para su control", Tesis de doctorado, La Habana, 1997.
4. **Juanes, J. L. y otros:** "Dinámica de los sedimentos en la Península de Hicacos, Cuba. II - Efecto de las olas de viento en la zona costera". Revista *Ciencias de la Tierra y el Espacio* (11), 1986.
5. *Coastal Engineering Manual*, Parte 3, Capítulos 1 y 2, CERC, US Army, 2000.
6. **Hogben, N.; N. M. C. Dacunha and G. F. Olliver:** *Global Wave Statistics*, British Maritime Technology Limited, Inglaterra, 1986.
7. **Juanes, J. L.; E. Ramírez y V. S. Medvediev:** "Dinámica de los sedimentos en la Península de Hicacos, Cuba. I Variaciones morfológicas del perfil de playa", Revista *Ciencias de la Tierra y el Espacio* (10), 1985.

AUTORES

Ronnie Torres Hugues

Ingeniero Hidráulico, Máster en Ciencias, Asistente, Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

Luis Córdova López

Ingeniero Hidráulico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba

Method of littoral sediment transport estimation in sand beaches

Abstract

Today, beaches are in a critical situation due to erosion. Beaches are very significant for the economy and tourism, therefore it is important to know the rate of sediment transport and the behavior of it. This work proposes a methodology based on used international models to estimate magnitude and direction of the littoral sediment transport. The method exposed proposes the use of Longuet-Higgins's velocity formula in Bijker's method to obtain cross shore distribution of alongshore sediment transport. However, this requires the values in the surf zone which is solved according to the methodology planted in Coastal Engineering (2000) of Technical University of Delft. Calibration is make for two study.

Key words: longshore sediment transport, sand beach, Varadero, crossshore distribution, Bijker