

LIBRO: PRY. PROYECTO
TEMA: PUE. Puertos
PARTE: 1. ESTUDIOS
TÍTULO: 07. Estudios de Transporte Litoral
CAPÍTULO: 007. Determinación de los Cambios en la Línea de Costa

A. CONTENIDO

Este Manual contiene los procedimientos para determinar los cambios en la línea costera, necesarios para la elaboración del estudio de transporte litoral para puertos, que realice la Secretaría con recursos propios o mediante un Contratista de Servicios y que se indica en la Fracción E.6. de la Norma N·PRY·PUE·1·07·001, *Ejecución de Estudios de Transporte Litoral*. El propósito de este Manual es describir un modelo simple que permita calcular los cambios que genera, en la línea de costa y en el oleaje local, la construcción de una estructura.

B. REFERENCIAS

Este Manual se complementa con las siguientes:

NORMAS Y MANUALES	DESIGNACIÓN
Ejecución de Estudios de Transporte Litoral	N·PRY·PUE·1·07·001
Cuantificación del Transporte Litoral	M·PRY·PUE 1·07·004
Determinación del Estado Morfodinámico de las Playas	M·PRY·PUE 1·07·005

C. REQUISITOS

Para determinar los cambios en la línea de costa, se requiere contar con la siguiente información:

- C.1.** Las cartas topográficas, batimétricas y geológicas, en las escalas disponibles, publicadas por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, de los cuales se obtiene la localización de las vías de comunicación y características generales de la zona. Además, en caso de existir, podrá usarse la información aportada por estudios topográficos, batimétricos y geológicos efectuados previamente.
- C.2.** Las cartas náuticas y portulanos de la Secretaría de Marina, o de organismos internacionales reconocidos.
- C.3.** Las fotografías aéreas e imágenes de satélite que permitan observar la zona en diferentes épocas y así detectar cambios morfológicos.
- C.4.** El proyecto geométrico del puerto, que incluya trazo, elementos, elevaciones, datos de bancos de nivel, referencias topográficas.
- C.5.** El perfil de la playa bajo estudio, calculado de acuerdo con lo indicado en el Manual, M·PRY·PUE 1·07·005, *Determinación del Estado Morfodinámico de las Playas*, que permita conocer su pendiente del fondo β , expresada en grados.

C.6. Los estudios de oleaje que contengan o permitan calcular:

- Altura de la ola en aguas profundas H_0 , expresada en m
- Altura de ola en el morro H_{morro} , expresada en m
- Altura de ola en la zona de rompientes, H_B , expresada en m
- Longitud de onda en aguas profundas L_0 , expresada en m

Los estudios comprenderán un régimen estacional y anual del oleaje e incluirán parámetros como la frecuencia de presentación para diferentes rangos de altura y periodos del oleaje, preferentemente de mediciones y, de no ser posible, de fuentes de recopilación internacionales actualizadas.

C.7. La refracción del oleaje normal desde aguas profundas hasta la zona de estudio, en el caso que existan obras de protección como son escolleras, rompeolas, rompeolas separados de la costa y protecciones marginales, entre otras, con el propósito de analizar los fenómenos de difracción, reflexión y refracción del oleaje mediante modelos matemáticos que hagan intervenir en forma conjunta los fenómenos oceanográficos antes señalados, de acuerdo con lo indicado en la Fracción D.2. de este Manual.

D. ESTIMACIÓN DE LA EVOLUCIÓN PLAYERA POR EFECTO DE LA CONSTRUCCIÓN DE OBRAS EXTERIORES

D.1. METODOLOGÍA

D.1.1. En forma general, el procedimiento para la aplicación de cualquier modelo de cambio en la línea de costa incluye las siguientes actividades:

- D.1.1.1.** Recopilar la información que se indica en la Cláusula C. de este Manual, la cual será revisada a fin de evaluar si los datos disponibles son representativos de la zona, así como identificar condiciones estacionales, anuales y extraordinarias (tormenta).
- D.1.1.2.** A partir de los datos disponibles, determinar las condiciones iniciales, tales como altura de ola y dirección en el punto de rotura a lo largo de la línea de costa y en el morro, utilizando un modelo numérico de difracción-refracción, para con ellas iniciar la modelación. Un ejemplo de este tipo de modelo se establece en la Fracción D.2. de este Manual.

Con la información obtenida en el perfil de la playa bajo estudio de acuerdo con lo señalado en la Fracción C.5. de este Manual, y para realizar las modelaciones numéricas a las que se hace referencia en este Párrafo, se definirán las siguientes características del oleaje representativas para el estudio de los cambios de la línea de costa:

a) Período medio del oleaje

$$\bar{T} = \frac{1}{n_k} \sum_{k=1}^{n_k} T_k$$

Donde:

- \bar{T} = Período medio del oleaje, (s)
- n_k = Número total de datos del oleaje
- T_k = Período del oleaje k , (s)

b) Altura de ola media del oleaje

$$\bar{H} = \sqrt{\frac{\frac{1}{n_k} \sum_{k=1}^{n_k} T_k * H^2_k}{\bar{T}}}$$

Donde:

- \bar{H} = Altura de ola media, (m)
- H_k = Altura de ola k , (m)

c) Componente transversal (on-offshore) del flujo de energía del oleaje

$$F_1 = \frac{1}{n_k} \sum_{k=1}^{n_k} T_k * H^2 \cos \alpha_k$$

Donde:

- F_1 = Componente transversal del flujo de energía del oleaje, (ton-m/m)
- α_k = Ángulo de incidencia del oleaje k , (grados)
- \bar{H} = Altura de ola media, (m)
- H_k = Altura de ola k , (m)

d) Componente a lo largo de la costa del flujo de la energía del oleaje

$$F_2 = \frac{1}{n_k} \sum_{k=1}^{n_k} T_k * H^2 \text{sen} \alpha_k$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{F_2}{F_1} \right)$$

Donde:

- F_2 = Componente a lo largo de la costa del flujo de la energía del oleaje, (ton- m/m)
- α_k = Ángulo de incidencia del oleaje k , (grados)
- α = Dirección representativa del oleaje, (grados) (dirección resultante)

D.1.1.3. Cálculo del transporte de sedimentos a lo largo de la línea de costa con alguna de las formulaciones presentadas en la Tabla 2 del Manual M·PRY·PUE·1·07·004, *Cuantificación del Transporte Litoral*. Este transporte permitirá la determinación del movimiento de la línea de costa causado por la estructura.

D.1.1.4. Cálculo del cambio en la línea de costa, por ejemplo, con la formulación que se describe en la Fracción D.3. de este Manual.

D.1.2. Una vez calculada una primera posición de la línea de costa, se reinicia el procedimiento a partir de lo señalado en el Párrafo D.1.1.2. de este Manual y así sucesivamente hasta que se alcance el equilibrio (misma posición de la línea de costa para dos iteraciones sucesivas) o cuando se llegue a un límite físico (por ejemplo, que la playa tope con la estructura), obteniéndose así, la posición final de la línea de costa.

D.2. MODELO DE TRANSFORMACIÓN DEL OLAJE POR DIFRACCIÓN-REFRACCIÓN

En el caso de cambio en la línea de costa debido a la construcción de estructuras, se utilizará un modelo en el que se considere la difracción como fenómeno reinante y a la refracción (incluido el efecto de fondo) en segundo término pero sin despreciarla. A continuación se presenta un modelo que para fines ingenieriles y mediando entre complejidad y precisión es de uso aceptable (Horikawa (1988)).

Si el proyectista decide utilizar un modelo distinto para el cálculo del oleaje difractado y refractado, se presentará la correspondiente justificación.

El procedimiento de cálculo es el siguiente:

D.2.1. Se divide la zona de interés en una zona iluminada, donde la refracción es más importante y en una zona de sombra donde los efectos de la difracción son dominantes, como se muestra en la Figura 1 de este Manual.

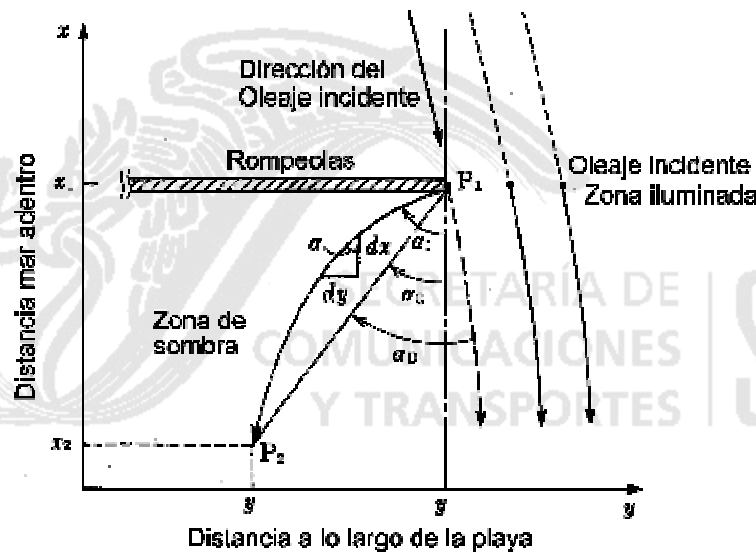


FIGURA 1.- Esquema para el cálculo del oleaje

D.2.2. En este modelo, cuando se analiza el ángulo del oleaje dentro del área de sombra, se supone que los rayos parten radialmente desde el extremo de la estructura, con un ángulo α_1 hasta alcanzar el punto de rotura P_2 con un ángulo α_2 .

D.2.3. La altura de ola en un punto se determina mediante la ecuación:

$$H = K_D \cdot K_R \cdot K_S \cdot H_{morro}$$

Donde:

H = Altura de ola local, (m)

H_{morro} = Altura de ola en el extremo de la estructura, (m)

K_D = Coeficiente de difracción, adimensional, que puede calcularse con el método de Penney (1952) el cual es aplicable a oleaje sinusoidal, o con el método simplificado de Goda (1985), el cual se aplica a oleaje irregular

- K_R = Coeficiente de refracción, (adimensional)
- K_S = Coeficiente de fondo, (adimensional)
- h = Profundidad, (m)
- α = Dirección del oleaje en un punto, (grados)
- α_D = Ángulo entre la dirección natural del oleaje y la línea que une los puntos P_1 y P_2

D.2.4. Cálculo de los coeficientes de fondo y refracción

Conocidas la dirección del oleaje y la altura de ola en el morro de la estructura de acuerdo con la información requerida en la Cláusula C. de este Manual, se definirá un incremento dx , en sentido perpendicular a la línea de costa para ir trazando los rayos. El incremento dx se recomienda tomarlo no mayor de 10 m a fin de obtener una precisión adecuada. El primer punto por calcular será un punto a una distancia dx desde la estructura hacia la costa.

La dirección del oleaje en este primer punto se calcula con la ecuación

$$\alpha_1 = \arcsen \left[\frac{C_1}{C_{\text{morro}}} \text{sen} \alpha_{\text{morro}} \right]$$

Donde:

- α_1 = Dirección del oleaje en el punto por calcular, (grados)
- α_{morro} = Dirección del oleaje en el morro, (grados)
- C = Celeridad de la onda, (m/s) el cual se obtiene con la fórmula:

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh(kh)$$

- g = Aceleración debida a la gravedad terrestre, (m/s²)
- T = Periodo del oleaje, (s)
- h = Profundidad del punto por calcular, (m)
- k = Número de onda, (m⁻¹), calculada a partir de:

$$\left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 = gk \tanh(kh)$$

A partir del segundo punto, la dirección se calculará con la siguiente ecuación

$$\alpha_i = \arcsen \left[\frac{C_i}{C_{i-1}} \text{sen} \cdot \alpha_{i-1} \right]$$

en la que los subíndices i e $i-1$ indican el punto por calcular y el punto anterior, respectivamente.

Los ángulos así calculados se utilizan para determinar el coeficiente de refracción con las ecuaciones

$$K_R = \left[\frac{\cos \cdot \alpha_{morro}}{\cos \cdot \alpha_1} \right]^{1/2}$$

para el primer punto, y

$$K_R = \left[\frac{\cos \cdot \alpha_{i-1}}{\cos \cdot \alpha_i} \right]^{1/2}$$

para los puntos segundo en adelante.

Cuando se analiza el ángulo del oleaje dentro del área de sombra α , se parte de la suposición de que los rayos salen desde el extremo de la estructura (morro), con un ángulo α_1 (el cual se fija arbitrariamente) hasta alcanzar el punto de rotura. De modo que se trazarán los rayos iniciando con α_1 de un grado hasta llegar a noventa grados. En el caso de la zona iluminada, sólo se traza un rayo iniciando con α_{morro} y se repite a lo largo de la costa.

Por lo que respecta al coeficiente de fondo, se calcula empleando la celeridad de grupo, la cual se determina a partir de

$$C_g = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\frac{4\pi h}{L}}{\sinh\left(\frac{4\pi h}{L}\right)} \right] C$$

donde la celeridad de grupo está expresada en m/s y el coeficiente de fondo, para el primer punto, queda:

$$K_S = \left(\frac{C_{g_{morro}}}{C_{g1}} \right)^{1/2}$$

en donde los subíndices *morro* y *1* corresponden a la celeridad de grupo en el morro y en el primer punto, respectivamente. Mientras que para los puntos del segundo en adelante se tiene:

$$K_S = \left(\frac{C_{g_{i-1}}}{C_{g_i}} \right)^{1/2}$$

en la que los subíndices *i* e *i-1* indican el punto por calcular y el punto anterior, respectivamente.

D.2.5. Valores del parámetro de rotura

El parámetro de rotura en aguas someras depende del peralte de la ola en aguas profundas H_0/L_0 , y la pendiente de la playa; este parámetro puede calcularse a partir de alguna de las siguientes expresiones, cuyo uso es indistinto en la práctica:

$$\gamma = 1,1(\tan \beta)^{1/6} \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-1/12}$$

$$\gamma = 1,16 \left[\frac{\tan \beta}{\left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{1/2}} \right]^{0,22}$$

Donde:

γ = Parámetro de rotura en aguas someras, (adimensional)

β = Pendiente del fondo, (grados)

Al término del trazado de los rayos tanto en la zona de sombra como en la iluminada, se compara la altura de ola calculada con el criterio de rotura, esto es, si la altura de ola en un punto es mayor que el producto del parámetro de rotura por la profundidad, la ola ha roto, de modo que la altura de ola de rotura se encuentra con la ecuación

$$H_B = \gamma h$$

Donde:

H_B = Altura de ola de rotura, (m)

h = Profundidad, (m)

γ = Parámetro de rotura en aguas someras, (adimensional)

D.2.6. Ejemplo de aplicación del modelo de transformación del oleaje por difracción-refracción

Hallar la altura de ola de rotura para una zona con líneas batimétricas rectas y paralelas a la costa. La pendiente del fondo es 1:10, el periodo 10 s y se ha medido, en aguas profundas, una altura de ola de 15 m con dirección de incidencia de 30°. Utilizar un valor de 0,8 para el parámetro de rotura en aguas someras.

Al no existir una fuente de difracción, la ecuación con que se determina al altura de ola es

$$H = K_R \cdot K_S \cdot H_0$$

En la que el coeficiente de difracción se ha igualado a la unidad y el subíndice 0 indica propiedades en aguas profundas.

Para iniciar el cálculo, se determina la longitud de onda en aguas profundas, esto es

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} = \frac{9,81 * 10^2}{2\pi} = 156,13m$$

Con lo que se ha completado la información necesaria para la primera iteración, a saber, $L_0 = 156,13$ m es la longitud de onda calculada y $\alpha_0 = 30^\circ$ es el ángulo de incidencia en aguas profundas.

Para la segunda iteración se estimarán las características de la onda a una distancia de 750 m mar adentro (esta distancia se ha elegido arbitrariamente). Así, $h_1 = 75$ m y $L_1 = 155,41$ m. Se estiman ahora las celeridades de la iteración anterior y de la iteración actual que son, respectivamente:

$$C_0 = \frac{L_0}{T} = \frac{156,13}{10} = 15,61 \cdot m / s$$

y

$$C_1 = \frac{L_1}{T} = \frac{155,41}{10} = 15,54 \cdot m / s$$

La nueva dirección de la onda se determina empleando la ley de Snell como sigue:

$$\alpha_1 = \arcsen\left(\frac{15,54}{15,61} \sen 30\right) = 29,85^\circ$$

Ahora se realiza el cálculo de las celeridades de grupo de la iteración anterior y de la actual, que son:

$$C_{g0} = \frac{C}{2} = 7,81 \cdot m / s$$

$$C_{g1} = \frac{C}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh \cdot 2kh}\right) = \frac{15,52}{2} \left(1 + \frac{2 \cdot \frac{2\pi}{155,41} \cdot 75}{\sinh \cdot 2 \cdot \frac{2\pi}{155,41} \cdot 75}\right) = 7,99 \cdot m / s$$

En este momento se cuenta ya con la información necesaria para evaluar los coeficientes de refracción:

$$K_R = \sqrt{\frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha_1}} = \sqrt{\frac{\cos 30}{\cos 29,85}} = 0,999$$

Y de fondo

$$K_S = \sqrt{\frac{C_{g0}}{C_{g1}}} = \sqrt{\frac{7,81}{7,98}} = 0,989$$

Finalmente se estima la altura de local

$$H_1 = H_0 \cdot K_S \cdot K_R = 15 \cdot 0,989 \cdot 0,999 = 14,82 \cdot m$$

El criterio de rotura indica que la ola rompe si $H_1 = 14,82$ m > $0,8h = 0,8 \cdot 75 = 60$ m, lo cual, al no cumplirse indica que el proceso iterativo debe continuar.

A continuación se presenta, en la Tabla 1, el resumen con los resultados de las iteraciones.

TABLA 1.- Resumen de las iteraciones del ejemplo de aplicación

<i>Dist</i> m	<i>h</i> m	<i>L</i> m	<i>C</i> m/s	<i>Kh</i>	<i>C_g</i> m/s	<i>α</i> °	<i>cos α</i>	<i>K_R</i>	<i>K_S</i>	<i>H</i> m
		156,13	15,61	40,24	7,81	30,00	0,866	-	-	15,00
750	75	155,41	15,54	3,03	7,99	29,85	0,867	0,999	0,988	14,82
700	70	155,06	15,51	2,84	8,06	29,77	0,868	1,000	0,996	14,75
650	65	154,56	15,46	2,64	8,14	29,67	0,869	0,999	0,995	14,66
600	60	153,82	15,38	2,45	8,25	29,51	0,870	0,999	0,993	14,55
550	55	152,78	15,28	2,26	8,39	29,29	0,872	0,999	0,992	14,42
500	50	151,30	15,13	2,08	8,55	28,98	0,875	0,998	0,990	14,26
450	45	149,23	14,92	1,89	8,74	28,55	0,878	0,998	0,989	14,08
400	40	146,37	14,64	1,72	8,94	27,95	0,883	0,997	0,989	13,88
350	35	142,50	14,25	1,54	9,14	27,15	0,890	0,996	0,989	13,68
300	30	137,29	13,73	1,37	9,29	26,08	0,898	0,995	0,992	13,50
250	25	130,38	13,04	1,20	9,36	24,68	0,909	0,994	0,996	13,37
200	20	121,24	12,12	1,04	9,27	22,85	0,922	0,993	1,005	13,34
190	19	119,08	11,91	1,00	9,23	22,42	0,924	0,998	1,003	13,35
180	18	116,78	11,68	0,97	9,17	21,96	0,927	0,998	1,003	13,37
170	17	114,36	11,44	0,93	9,10	21,48	0,931	0,998	1,004	13,40
160	16	111,78	11,18	0,90	9,01	20,98	0,934	0,998	1,005	13,45
150	15	109,05	10,91	0,86	8,91	20,44	0,937	0,998	1,006	13,50

Como se puede ver en la última línea de la Tabla 1, en la profundidad de 15 m se cumple el criterio de rotura, por lo que la altura de ola de rotura es de 13,50 m.

D.3. MODELO DE CAMBIO EN LA LÍNEA DE COSTA

El modelo de cambio en la línea de costa es un método sofisticado para calcular el balance de sedimentos que se basa en la ecuación de continuidad del sedimento.

Considérese un cambio diferencial en el volumen, ΔV , en un intervalo, Δt , de una sección de playa, como se muestra en las Figuras 2 y 3 de este Manual, donde el eje y se toma paralelo a la línea de costa y el eje x perpendicular a ésta, es decir, en el sentido de propagación del oleaje.

La sección del perfil en la Figura 2 de este Manual, tiene un ancho Δy medido sobre la línea de costa y el cambio, Δx , se registra hacia mar adentro. La hipótesis básica de este modelo es que el perfil se mueve paralelamente a sí mismo hasta una profundidad D_s , a partir de la cual el perfil ya no cambia. En estas condiciones la relación de cambio del volumen en un intervalo de tiempo, Δt es:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{D_s \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{\Delta t}$$

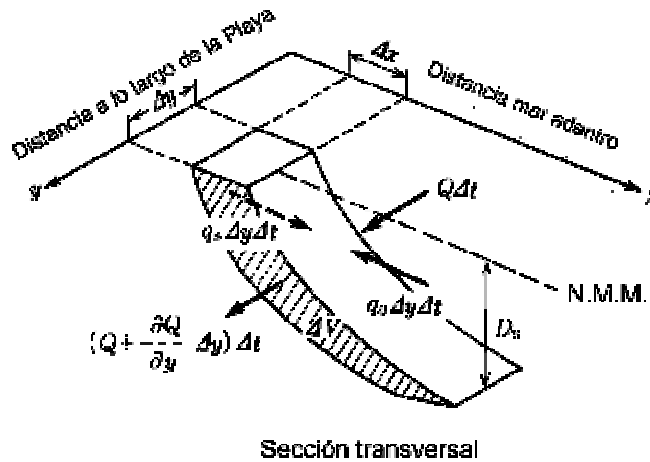


FIGURA 2.- Esquema de variables sección transversal

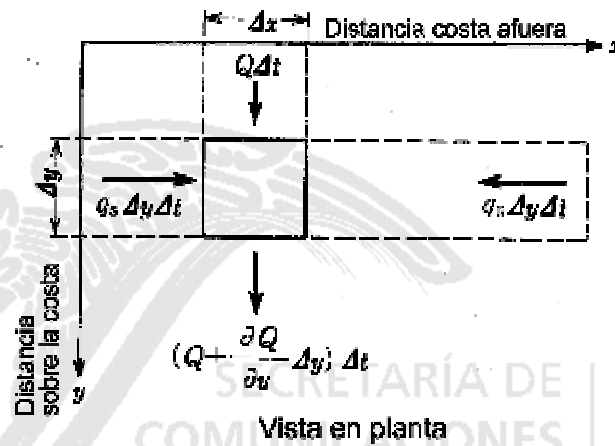


FIGURA 3.- Esquema de variables, vista en planta

Esta razón de cambio es controlada por la entrada y salida de sedimento a través de los cuatro lados de la sección, como se muestra en la Figura 3. De tal suerte que la ecuación de continuidad que gobierna la posición de la línea de costa es:

$$\frac{\partial x_s}{\partial t} + \frac{1}{D_s} \left(\frac{\partial Q}{\partial y} - q \right) = 0$$

Donde:

Q = Volumen de sedimento transportado, por unidad de tiempo, a lo largo de la costa, (m^3/s)

q = Tasa de sedimento que sale o entra de la sección por las caras de tierra y mar, ($m^3/s/m$), determinada con la siguiente expresión:

$$q = q_s + q_o$$

q_s = Tasa de entrada o salida de sedimento por unidad de longitud sobre la línea de costa, ($m^3/s/m$)

q_o = Razón de entrada y salida de volumen de sedimento por unidad de longitud en la dirección del oleaje, ($m^3/s/m$)

La tasa q representa ganancia o pérdida de sedimento por medios como pueden ser descarga de ríos o retiro de material por dragado; si este tipo de condiciones no están presentes en la zona de estudio, q toma el valor de cero.

D_S = Profundidad de cierre, (m), es la profundidad en la que el perfil de playa ya no se modifica y se estima a partir de

$$D_S = D_b + \left(2,28 - 10,9 \frac{H_0}{L_0} \right) H_0$$

D_b = Altura de la berma de la playa medida desde el nivel medio del mar, (m)

Para su aplicación en una malla a lo largo de la línea de costa, la ecuación de continuidad del sedimento se rescribe en forma de diferencias finitas como sigue:

$$xS_i = xS_{i-1} + \frac{\Delta t}{D_S \Delta y} (Q_i - Q_{i+1} + \Delta y q_i)$$

Donde

xS = Movimiento de la línea de costa paralelamente a sí misma, (m)

Q = Volumen de sedimento correspondiente a una celda, (m³/s)

Los subíndices $i-1$, i e $i+1$ indican los valores de las variables para la celda anterior, la de cálculo y la siguiente celda, respectivamente.

Con esta última expresión se calcula la posición de la línea de costa para cada incremento en el tiempo en cada celda.

El intervalo de tiempo puede ser fijado arbitrariamente, considerando que intervalos muy largos reducen el tiempo de cálculo pero disminuye la precisión del modelo. La práctica común indica el uso de intervalos entre 6 y 24 horas.

Por lo que respecta al intervalo Δy , corresponde al tamaño de las celdas definidas para el estudio, las cuales dependen del tamaño de la zona de interés y del número de puntos en que se desee evaluar el comportamiento de la línea de costa.

En la Figura 4 se muestra, como ejemplo, un esquema de malla, junto con la ubicación de las variables que intervienen en el modelo.

La solución al planteamiento del modelo de cambio en la línea de costa, se podrá hallar con el apoyo de programas de cómputo, como el *Genesis*, de los autores Gravens, Kraus y Hanson, que proporciona una buena correlación con la realidad y que se encuentra disponible en Internet en la dirección electrónica <http://home.swipnet.se/~w-55504/GEN95/Gen95.htm>

E. BIBLIOGRAFÍA

Clausner, B., *Field Comparison of Four Nearshore Survey Systems*, US Army Waterways Experiments Station, Vicksburg, EUA (1986).

Dean, R., *Heuristic models of sand transport in th surf zone*, Sydney, Australia (1973).

Goda, Y., *Random Seas and Design of Maritime Structures*, Universidad de Tokio, Tokio, Japón (1985).

Horikawa, K., *Nearshore Dynamics and Coastal Processes*, Universidad de Tokio, Tokio, Japón (1988).

Kraus, N., Larson, M. y Kriebel, D., *Evaluation of beach erosion and accretion predictions*, ASCE, (1991).

Kriebel, D., Dally, W. y Dean, R., *Undistorted Froude model for surf zone sediment transport*, Proc. 20th International Conf. on Coastal Eng., Vol. 119, (1986).

Penney, W. *The diffraction theory of sea waves and the shelter afforded by breakwaters*, Phil. Trans. Royal Society London, Vol. 244., (1952).

US Army, Corps of Engineering, *Coastal Engineering Manual*, Parte II, Cap. III, (Borrador) Washington, EUA

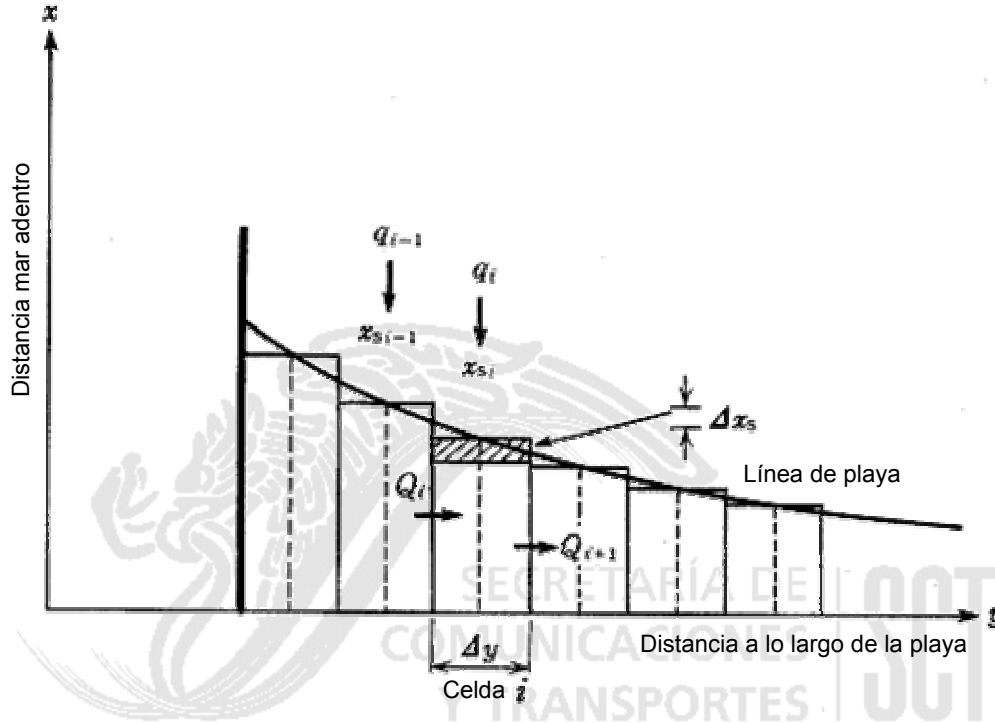


FIGURA 4.- Esquema de la malla para la aplicación del modelo de cambio en la línea de costa