



6 2e1
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

“ ARAGON ”

**SIMULACION NUMERICA DE LA TEORIA
DE UNA LINEA PARA PREDECIR LOS
CAMBIOS DE UNA PLAYA RECTILINEA**

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el Titulo de:

INGENIERO CIVIL

Presenta:

JESUS IGNACIO HEREDIA DOMINGUEZ

JUAN DE ARAZÓN

San Juan de Aragón, Edo. de Méx. 1990



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

| | Pag. |
|--|------|
| I INTRODUCCION | 1 |
| II SISTEMA DE CORRIENTES COSTERAS | 3 |
| 2.1) TIPOS DE CORRIENTES | 3 |
| 2.2) FACTORES QUE AFECTAN EL SISTEMA DE CORRIENTES LITORALES | 3 |
| III TRANSPORTE LITORAL A LO LARGO DE LA COSTA | 15 |
| 3.1) DIRECCION DEL MOVIMIENTO DE LA ARENA | 15 |
| 3.2) CALCULO DE LA CANTIDAD DEL TRANSPORTE LITORAL. | 17 |
| IV MODELACION DE LA TEORIA DE UNA LINEA | 23 |
| 4.1) ECUACION BASICA DE LA TEORIA DE UNA LINEA | 23 |
| 4.2) INTERPRETACION DEL ANGULO DEL OLEAJE INCIDENTE | 26 |
| 4.3) OLEAJES | 28 |
| V APLICACION DEL MODELO DE LA TEORIA DE UNA LINEA EN UNA PLAYA RECTILINEA | 39 |
| 5.1) COMPOSICION DEL PROGRAMA | 39 |
| VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 55 |
| REFERENCIAS | 57 |

I N T R O D U C C I O N

Desde el punto de vista de la ingeniería de costas, los fenómenos que mayor problemática presentan cuando se planea construir un puerto en una costa de arena o en la boca de un río son la erosión y el azolvamiento.

Estos fenómenos ocasionan cambios en la configuración de la playa. El estudio de los cambios, en realidad, no es tan simple, ya que la altura, el período y la dirección del oleaje varían constantemente, además de la existencia de mareas.

Sin embargo, la playa y la costa tienen tendencia a transformarse hacia una configuración más estable por fuerzas exteriores. En este proceso se -- presentará ya sea la erosión o el azolvamiento. Cuando estos fenómenos influyen sobre construcciones y caminos, es necesario construir obras de protección. Al pensar en estos fenómenos y al diseñar sus contramedidas, es muy importante poner atención a las tendencias de la deformación de la playa.

Sin embargo, el fenómeno del movimiento de arena es tan complicado que una sola parte de éste se puede analizar cuantitativamente. Por eso, al planear un puerto en una costa arenácea o en la boca de un río, se debe investigar el fenómeno del movimiento de arena alrededor del lugar correspondiente por medio de mediciones directas del fenómeno y durante la construcción se debe investigar el cambio del movimiento de arena, especialmente la evolución de la configuración del fondo del mar. Cuando surge un cambio no previsto, es necesario cambiar el plan o realizar la contramedida através de la observación o el ensayo en modelo físico. Pero probablemente realizar cambios sobre la construcción puede llegar a ser incosteable y en ocasiones erróneo y si los cambios se realizaran sobre un modelo físico podría llevarse menos tiempo para conocer el comportamiento correspondiente.

En el presente trabajo se desarrollará un modelo numérico para predecir los cambios de la línea de playa, particularmente para el caso de una playa - rectilínea sujeta a una condición de transporte litoral con la presencia de

diversas estructuras de protección, basándose en la teoría de una línea desarrollada por Peirnard Considere en 1954.

El presente trabajo se desarrollará de acuerdo con el siguiente orden:

En el capítulo número dos se presentan las propiedades y características de las corrientes costeras con sus respectivas clasificaciones.

En el capítulo número tres se presenta la forma de cálculo del transporte litoral a lo largo de la costa por diferentes métodos así como los modos de transporte denominados sobre el fondo y en suspensión.

En el capítulo número cuatro, en base a los parámetros de transporte litoral, período, altura e incidencia del oleaje y considerando una playa rectilínea se desarrolla un algoritmo y un programa de computadora para poder de terminar los cambios que pueda llegar a tener la línea de playa original en un tiempo determinado.

En el capítulo número cinco, utilizando el modelo numérico mencionado en el capítulo anterior, se determinan los cambios que pueda llegar a tener la playa rectilínea por efecto de la existencia de diferentes obras de protección como son: Rompeolas ubicados en diferentes partes de la playa en estudio, rompeolas ubicados en la desembocadura de un río y una escollera separada de la costa.

Finalmente en el capítulo número seis se formularán las conclusiones y las recomendaciones necesarias para la utilización del modelo numérico desarrollado en problemas específicos.

11 SISTEMA DE CORRIENTES COSTERAS.

2.1 Tipos de corrientes.

En el océano existen varios tipos de corrientes. Las corrientes que se discutirán en este capítulo son las generadas por el oleaje y que se presentan en la costa, por la presencia de los oleajes rompientes.

En la figura 2.1 se muestra en forma esquemática las zonas donde las corrientes litorales dominan.

Las corrientes oceánicas son dominantes en la pendiente continental y las corrientes de mareas son dominantes en la plataforma continental. Las corrientes dominantes en la zona cerca de la costa son las corrientes litorales.

La corriente producida por el esfuerzo cortante cuando el viento actúa sobre la superficie del agua se llama corriente de transporte.

En la desembocadura de ríos en el mar, existen corrientes fluviales - las cuales dependerán del tamaño del río, produciéndose por la diferencia de densidades del agua las denominadas corrientes de densidad.

En mar abierto, las velocidades de la corriente de marea son pequeñas comparadas en zonas de la costa, tales como bocas de bahías (velocidades del orden de 5 a 40 cm/seg. y como máximo de 50 cm/seg. El orden de las velocidades de la corriente de transporte es del 2 al 4% de la velocidad del viento en la superficie del agua.)

2.2 Factores que afectan al sistema de corrientes litorales.

Dentro de los factores que afectan en la generación del sistema de corrientes litorales se tienen:

A) Transporte de masa.

Al observar cuidadosamente el movimiento de un flotador, puesto en suspensión en un canal de oleaje, se puede notar que el material en suspensión

se moverá elípticamente y en un tiempo dado, su posición promedio cambiará lentamente en la misma dirección de la propagación del oleaje como se muestra en la fig. 2.2 este fenómeno es llamado "transporte de masa debido a los oleajes".

Figura 2.1 Dominio de acción de las corrientes litorales.

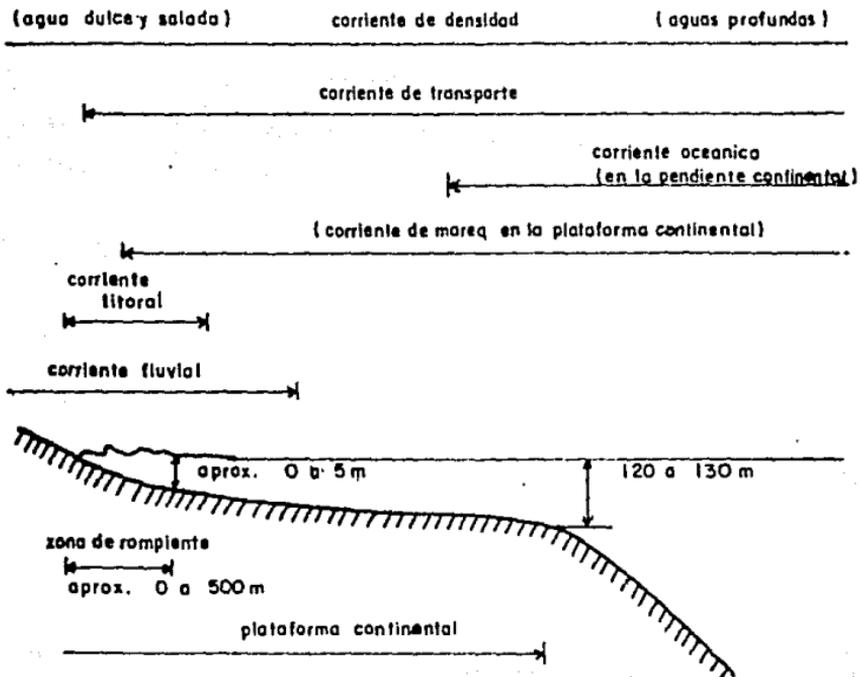
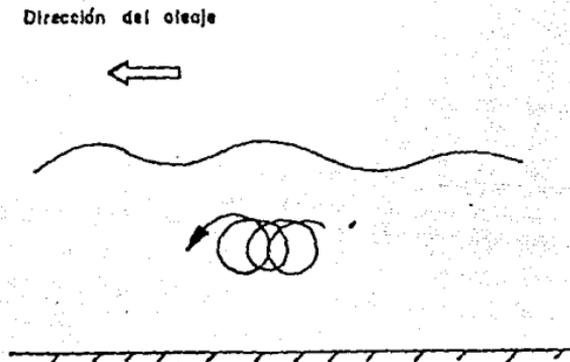


Figura 2.2. Movimiento de la partícula del agua

Dirección del oleaje



La existencia del transporte de masa, puede entenderse fácilmente si se considera la siguiente situación física. La partícula de agua bajo la cresta del oleaje se mueve en la misma dirección del oleaje y bajo el valle se mueve en dirección contraria a la propagación del oleaje. De acuerdo con la teoría del oleaje de pequeña amplitud estas velocidades son iguales en magnitud, pero son diferentes en dirección una de otra. La profundidad es grande cuando la cresta del oleaje pasa y la profundidad es pequeña cuando el valle del oleaje pasa. De esta manera, el volumen de agua transportado en la dirección del oleaje es mayor cuando pasa la cresta que cuando pasa el valle, produciéndose un transporte neto de agua en la dirección del oleaje. A este volumen neto transportado en la dirección del oleaje se le conoce con el nombre de "transporte de masa". Ver figura 2.3

Por lo anteriormente señalado, es fácil inferir que el transporte de masa es proporcional a la diferencia de nivel entre la cresta y el valle del oleaje (altura de la ola), el concepto de transporte de masa se explica por la segunda aproximación de la teoría del oleaje de Stokes y se expresa como:

$$\bar{U} = \frac{\pi^2 H^2}{2 L T} \frac{\cosh 2K (h + z)}{\sinh^2 Kh}$$

Donde:

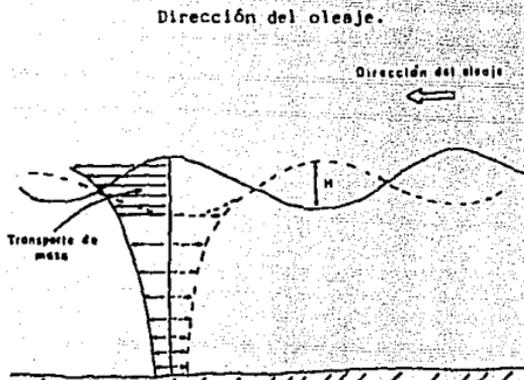
\bar{U} : Transporte de masa en (m/seg.)

h : Profundidad del mar en (m)

K : Número de oleaje

Z : Nivel donde se desea calcular el transporte de masa, $Z = -d$ en el fondo del mar.

Figura 2.3 Concepto de transporte de masa debido a los oleajes.



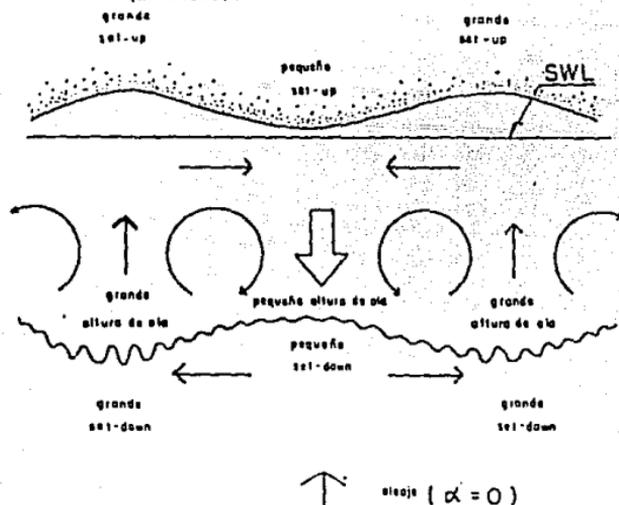
B) Esfuerzo radial (Radiación Stress)

Bowen (1969) y Longuet - Higgins (1970) demostraron teóricamente que las corrientes costeras (Near Shore Currents) son generadas por el esfuerzo radial, definido como el exceso de flujo de momento debido a la presencia de oleajes.

Si hay variación de la altura de la ola a lo largo de la costa se tendrá una variación de Wave set - down y Wave set - up. Produciéndose corriente en la zona de rompientes de áreas con Mayor wave set - up hacia áreas con menor wave set - up, fuera de la zona de rompientes las corrientes fluirán de áreas de pequeño wave set - down hacia áreas con mayor wave set - down.

En la figura 2.4 se presenta un modelo esquemático de los mecanismos de circulación de corrientes inducidas por wave set - down y set - up.

Figura 2.4 Mecanismo de circulación cerca de la costa por diferencias en el nivel medio del mar, con $\alpha = 0$ (diagrama esquemático).

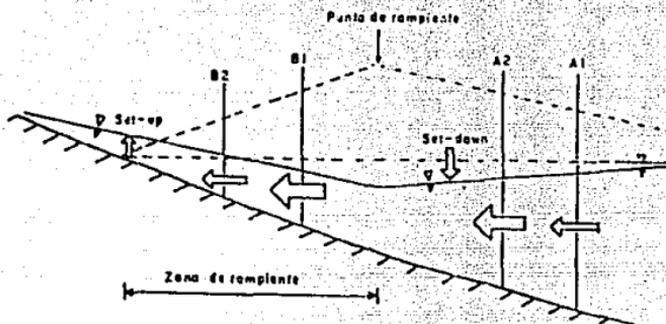


C) Descenso y ascenso del oleaje (Wave set - down y set - up.)

Al considerar la propagación del oleaje desde aguas profundas hacia la costa, como se sabe, la altura del oleaje va aumentando cada vez más hasta el punto de rompiente donde alcanza su máximo valor. Del punto de rompiente a la línea de costa, la altura de la ola decrece por la profundidad debido

al rompimiento del oleaje. La distribución del oleaje de aguas profundas a la costa se muestra en la fig. 2.5 con línea punteada.

Figura 2.5 Wave set - up y Wave set - down.



Considerando la situación en la zona de la playa exterior y definiendo dos secciones de control A_1 y A_2 en la fig. 2.5 El volúmen que pasa por la sección A_2 es mayor que el volúmen que pasa por la sección A_1 , porque la altura de ola es mayor en la sección A_2 que en la sección A_1 debido a que el transporte de masa es proporcional al cuadrado de la altura de ola. La causa de lo anterior, es debido a la pérdida de agua y a las pequeñas disminuciones del nivel medio de la superficie del mar.

Así, al ir aumentando paulatinamente la altura de la ola desde aguas profundas hasta el punto de rompiente, el nivel de la superficie del mar de crecerá continuamente hasta el punto de rompiente como se muestra en la fig. 2.5 con línea continua. Este fenómeno es llamado descenso del oleaje (Wave set - down).

El valor del descenso del oleaje es máximo en el punto de rompiente, el cual es proporcional a la altura de la ola en aguas profundas.

El descenso del oleaje (Wave set - up) se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\bar{h} = - \frac{H}{8} \frac{K}{\sinh 2 Kh}$$

Donde:

H : Altura de la ola en la profundidad de h en (m)

K : Número de ola definido como $2\pi/L$

Al considerar la propagación del oleaje del punto de rompiente hacia la costa y definiendo dos secciones de control B_1 y B_2 respectivamente en la -- fig. 2.5, se obtendrá un resultado similar al caso de la playa de altamar. -- Aumentando continuamente el nivel medio de la superficie del mar desde el -- punto de rompiente a la línea de costa, tal como se indica con línea continua en la figura mencionada.

Este fenómeno es llamado ascenso del oleaje (Wave set - up) y su valor es también proporcional a la altura de la ola en aguas profundas.

El ascenso del oleaje (Wave set - up) se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\bar{h}' = K' (h_b - h) + \bar{h}_b$$

Donde:

K : Constante, su valor puede obtenerse con la siguiente ecuación:

$$K' = \frac{1}{1 + (8/3) \gamma^2}$$

γ : Está definido por: $H = \gamma^2 (\bar{h}_b + h)$ en la zona de rompiente.

($\gamma = 0.73$ valor utilizado normalmente)

h_b : Profundidad en la rompiente.

R_D : Descenso del oleaje (Wave set - up) en la rompiente.

h: Profundidad en cuestión.

H: Altura del oleaje en la profundidad h.

Al propagarse los oleajes hacia la costa, el nivel medio de la superficie del mar cambiará con un gradiente determinado. Por lo tanto se requiere que el agua de mar transportada hacia la playa retorne hacia el mar cerca del fondo, pues de no existir esto, el nivel del agua en la playa subiría sin límite. Al romper las olas, la pendiente de la superficie del mar es balanceada por el esfuerzo radial (radiation stress).

D) Descripción tridimensional de las corrientes playeras.

Para describir tridimensionalmente el patrón de corrientes litorales consideremos una playa plana donde los oleajes inciden normales a la costa, como se muestra en la figura 2.6. En el campo la incidencia de la altura de ola no es constante, fluctuando en la dirección a lo largo de la costa debido a varias causas. Consideremos en la figura 2.6 un grupo de 3 líneas de referencia (normales a la costa). Poniendo la línea B en el centro, correspondiendo a la posición donde la altura del oleaje incidente es relativamente pequeña que en las otras dos secciones, como se muestra en la figura mencionada. El mecanismo de ocurrencia del sistema de corrientes en la zona de rompientes se explicará a continuación siguiendo la correspondencia de los símbolos mostrados en la fig. 2.6

a) Cuando los oleajes inciden normales a la costa ($\alpha = 0^\circ$) el transporte de masa genera corrientes en la dirección hacia la costa. Estas corrientes se les llama corrientes por transporte de masa.

b) El nivel medio del mar disminuye en la zona de rompiente por el descenso del oleaje, produciéndose corrientes de retorno hacia el mar. A estas corrientes se les llama corrientes de alimentación (rip feeder).

c) El valor del ascenso del oleaje (set - up) es proporcional a la altura del oleaje, por lo tanto, los valores del set - up cerca de la línea de costa en las líneas A y C son mayores que en la línea B. Como resultado de.

esto, el nivel medio de la superficie del mar se inclinará de A y C hacia B, las corrientes generales de la línea A a B y de la línea C a B se indican en la fig. 2.6 con el símbolo (C). A estas corrientes se les llama corrientes a lo largo de la costa.

d) El agua transportada de las líneas A y C hacia la línea B corre en dirección hacia el mar através de un área estrecha. A estas corrientes se les llama corrientes de retorno (rip current).

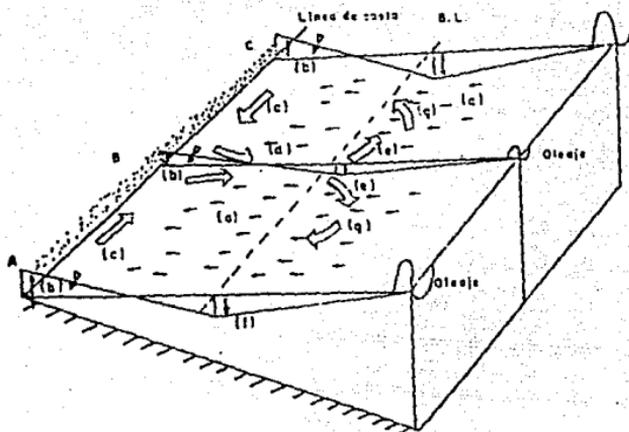
e) Las corrientes de retorno corren hacia fuera de la zona de rompiente, donde la velocidad de la corriente se reduce súbitamente debido a dos razones. Una de ellas debido al incremento de la profundidad, la otra se explicará en el siguiente inciso. Esta localización es llamada rip - head.

f) En el área fuera de la zona de rompiente, el nivel medio de la superficie del mar disminuye por el wave set - down. Los valores del set - down son como ya se ha mencionado proporcionales a la altura de la ola. Así, -- los niveles medio de la superficie del mar en las líneas A y C son menores que en la línea B.

g) Lo anterior significa que el nivel medio de la superficie del mar se inclinará de la línea B hacia ambos lados, generándose corrientes a lo largo de la costa en la zona de la playa de alta mar. En esta área, como la profundidad es grande, las velocidades de la corriente son débiles. Estas corrientes no son llamadas corrientes a lo largo de la costa, no hay ningún nombre para denominarlas.

El transporte de masa debido a los oleajes, las corrientes a lo largo de la costa (longshore currents), las corrientes de alimentación (rip feeder) y las corrientes de retorno (rip currents), son llamadas sistema de corrientes litorales. Las corrientes litorales son generadas por la incidencia de los oleajes en la costa, siendo completamente diferentes a las corrientes de mareas, las cuales son generadas principalmente por los movimientos de la tierra y la luna.

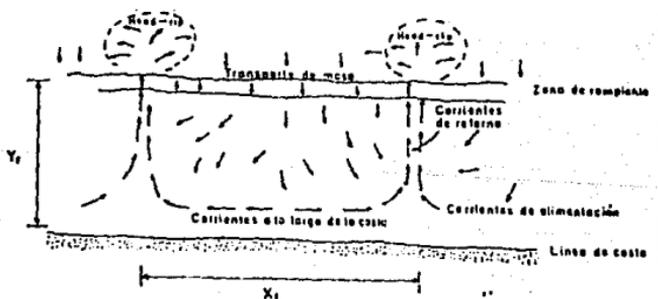
Figura 2.6 Diagrama conceptual del sistema de corrientes.



Es importante y útil recordar que la dirección de las corrientes en la zona de rompientes es de las áreas de altura de ola grande a áreas de altura de ola menor en la playa de altamar.

La vista en planta del sistema de corrientes litorales se muestra en la fig. 2.7, de acuerdo con datos de campo.

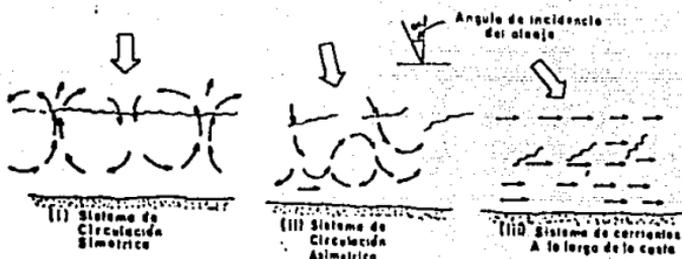
Figura 2.7 Vista en planta del sistema de corrientes litorales.



E) Corrientes a lo largo de la costa (Longshore currents)

En los anteriores incisos se discutió el sistema de corrientes litorales cuando la incidencia del oleaje es normal a la playa ($\alpha = 0$). Cuando los oleajes inciden con algunos ángulos ($\alpha \neq 0$ incidencia oblicua del oleaje), el sistema de corrientes se distorsiona por la descomposición del oleaje en sus componentes de la costa hacia el mar y la componente a lo largo de la costa, los patrones distorsionados se pueden inferir con lo discutido en los anteriores incisos. Los patrones del sistema de corrientes litorales observados en el campo se muestran esquemáticamente en la fig. 2.8

Figura 2.8 Patrones del sistema de corrientes litorales.



Caso (i): Los oleajes incidentes con incidencia normal a la línea de Costa (ángulo igual a cero por definición). Forman un patrón de circulación simétrica de corrientes y se forman en la zona de rompientes.

Caso (ii): El ángulo de incidencia del oleaje es de algunos grados pero pequeño. Si descomponemos los oleajes en sus componentes hacia el mar y a lo largo de la costa la primera componente producirá patrones de circulación simétrica como el mostrado en la fig. 2.8 (i), la segunda componente del oleaje producirá únicamente corrientes a lo largo de la costa. Por lo tanto, las corrientes resultantes formarán un patrón simétrico de circulación.

Caso (iii): El ángulo de incidencia es mayor que en el caso (ii). La componente de la costa hacia el mar del oleaje incidente será pequeño y la componente a lo largo de la costa será grande, por lo tanto, el flujo de la circulación - desaparecerá y únicamente las corrientes a lo largo de la costa se mantendrán.

Comentarios:

Es bien sabido que una gran cantidad de sedimentos se transporta en la zona de rompientes. Los materiales del mar son agitados y puestos en suspensión por las acciones de los oleajes y la turbulencia debida al rompimiento del mismo, los cuales fácilmente se transportarán por las corrientes litorales. Resultando de gran importancia el conocimiento de las corrientes litorales para comprender el fenómeno básico del transporte litoral.

En el caso (i) de la figura 2.8, los sedimentos en suspensión serán transportados por la circulación de corrientes únicamente dentro de las cel das de circulación. No existiendo severas deformaciones de la playa en l ar go tiempo. Por otro lado en el caso (ii), los sedimentos en suspensión serán transportados a grandes distancias en la dirección a lo largo de la costa, provocando severas deformaciones de la playa en algunos casos.

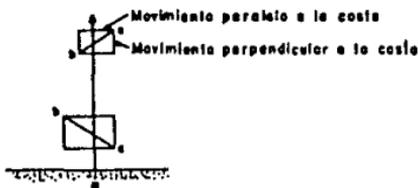
III TRANSPORTE LITORAL A LO LARGO DE LA COSTA.

3.1 Dirección del movimiento de arena.

Generalmente el movimiento de arena se divide en la componente del movimiento de la arena paralela a la costa y la componente del movimiento de la arena perpendicular a la misma.

Esta clasificación indica las componentes paralela y perpendicular a la costa del movimiento resultante cuando el sedimento se mueve del punto "a" hacia el punto "b" como se muestra en la fig. 3.1

Figura 3.1 Componentes del movimiento de la arena.



La dirección del movimiento resultante de la arena al relacionar las componentes del movimiento antes mencionado, tiene mucha relación con la magnitud de los oleajes incidentes, pudiéndose establecer que el movimiento de la arena tendrá una orientación hacia el mar en época de tormentas y una orientación hacia tierra en época de calma con oleajes pequeños.

Los oleajes y las corrientes en la naturaleza varían con el tiempo, resultando como consecuencia una variación de la magnitud del transporte litoral. Pero al considerar un período de tiempo largo (una estación o un año), existirá la posibilidad de entender la orientación predominante del transporte litoral para cada costa. Esta orientación se conocerá al investigar en el campo las siguientes características:

(1) Variación de la composición de tamaño y mineral pesado de los sedimentos a lo largo de la costa.

(2) Componentes a lo largo de la costa de la potencia del oleaje.

En general, al sumar las componentes a lo largo de la costa de la potencia del oleaje (flujo de energía del oleaje) durante un largo tiempo, la orientación predominante de esa suma coincidirá con la orientación del transporte litoral. Pero en lugares donde la corriente oceánica es fuerte, es necesario tomar en cuenta esta corriente para definir la orientación predominante del transporte litoral. El método de cálculo de las componentes a lo largo de la costa de la potencia del oleaje se explicará posteriormente.

(3) Configuración de la playa y características de los sedimentos alrededor de estructuras: (escolleras, rompeolas, espigones, etc.)

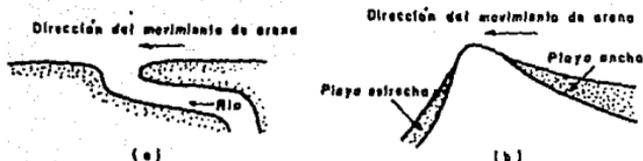
Generalmente cerca de una estructura, la línea de playa avanza hacia el mar en el lado de arriba del transporte litoral y retrocede hacia tierra en el lado de abajo del transporte litoral y la pendiente de la cara de la playa se hace más abrupta en el lado de arriba del transporte litoral y más pequeña en el lado de abajo.

(4) Configuración alrededor de cabos o bocas de ríos.

Si no existen espigones en la boca de ríos, generalmente la boca presenta la tendencia de desviarse hacia la orientación del transporte litoral tal como se indica en la figura 3.2 (a). Esta desviación tiene la relación con la orientación del río aguas arriba y con el cudal del mismo, por lo que en ocasiones la boca del río se desvía en dirección contraria a la del transporte litoral.

Alrededor de cabos, el ancho de la playa es mayor en el lado de arriba del transporte litoral y más pequeño en el lado de abajo del mismo, tal como se indica en la fig. 3.2 (b).

Figura 3.2 Configuración alrededor de la boca de ríos y cabos.



Es difícil o muchas veces se cometen errores graves al decidir la orientación del transporte litoral al investigar una o solo algunas de las características descritas arriba, resultando necesario investigar en la medida de lo posible todas las características mencionadas.

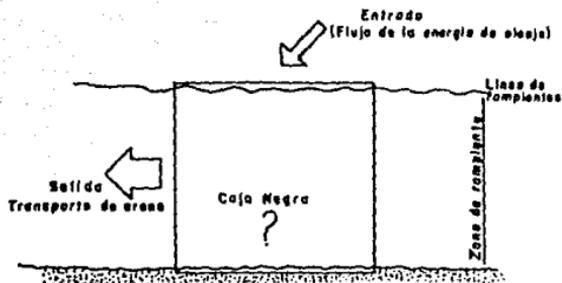
Generalmente la orientación del transporte litoral cambia con la estación, resultando peligroso decidir la orientación del mismo con base en la investigación de las características mencionadas durante una sola campaña estacional.

3.2 Cálculo de la cantidad del transporte litoral.

En la zona de rompientes una gran cantidad de arena es transportada por la acción de oleajes y corrientes litorales. Sin embargo, el mecanismo del transporte de arena no se conoce todavía en el mundo.

Por lo anterior, es algunas veces útil poner el mecanismo desconocido dentro de un modelo conceptual de caja negra, como se indica en la fig. 3.3. En esta caja negra no es necesario saber qué pasa dentro de ella y examinaremos únicamente la relación entre lo que entra y lo que sale.

Figura 3.3 Modelo de caja negra para el transporte litoral a lo largo de la costa.



Lo que sale de la caja negra corresponde a la cantidad de transporte litoral a lo largo de la costa y lo que entra corresponde a los oleajes. -- Existen muchos parámetros que representan las características del oleaje, tales como altura, el período, la esbeltez, la energía del oleaje, el flujo de energía del oleaje etc. De los cuales, el que se utilizará será el flujo de energía del oleaje, porque la energía se consume al transportar los materiales del fondo. En adición, el flujo de la energía del oleaje es proporcional al cuadrado de la altura de la ola y la ocurrencia del mecanismo de corrientes litorales como se ha explicado anteriormente, también depende del cuadrado de la altura de ola. Por todo lo anterior resulta necesario estudiar la relación de la entrada y salida del modelo de caja negra expresado como:

$$Q = F (P/E) \quad (3.1)$$

Donde: Q = Transporte litoral a lo largo de la costa

P/E = Componente a lo largo de la costa del flujo de la energía del oleaje.

F = Función.

Muchos investigadores han estudiado la relación de la ec. (3.1) y más concretamente la han expresado como:

$$Q = \sum P_b^n$$

Donde: Q : Transporte litoral que pasa por una superficie perpendicular a la línea de costa en un tiempo dado:

ω, n : Coeficientes, cuyo valor se determina por mediciones en el campo

P_b : Parámetro proporcionado por la componente por unidad de ancho a lo largo de la costa, de la energía de la ola que se transporta en un tiempo dado.

A continuación se indica la manera de calcular el parámetro P_b :

Tomando como referencia la fig. 3.4, la energía de una ola significativa en la línea de rompiente que se transporta por una unidad de ancho de cresta de oleaje se expresa como:

$$w_b = \left\{ \frac{P_g}{8} (H_{1/3})^2 C_g \right\}_b \quad (3.2)$$

El subíndice b , indica en la línea de rompiente y C_g indica la celeridad de grupo.

La energía transportada por el ancho b_b se expresa como $b_b w_b$

La componente $b_b w_b$ a lo largo de la costa es $b_b w_b \sin \alpha_b$, y expresada por unidad de longitud de playa es:

$$b_b w_b \cdot \sin \alpha_b \cdot \frac{1}{b_b / \cos \alpha_b} = w_b \sin \alpha_b \cdot \cos \alpha_b \quad (3.3)$$

La suma de la componente de la energía transportada durante largo tiempo se expresa como:

$$\begin{aligned} P_b &= \sum w_b \sin \alpha_b \cdot \cos \alpha_b \\ &= \sum \left(\frac{P_g}{8} (H_{1/3})^2 C_g \sin \alpha_b \cos \alpha_b \right)_b \end{aligned} \quad (3.4)$$

En el campo el oleaje es irregular, debiéndose calcular el parámetro P_b con la raíz media cuadrática de los oleajes. (Hrms)

Considerando que las alturas de ola se distribuyen de acuerdo con la --

distribución de Rayleigh, se tiene:

$$\bar{H} = (2\pi m_0)^{1/2} ; H_{1/3} = 1.6 \bar{H} \text{ y } H_{rms}^2 = 8 m_0$$

Al relacionar las expresiones anteriores se tiene:

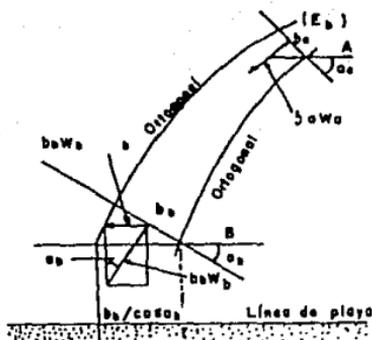
$$H_{1/3} = 1.6 \bar{H} = 1.6 (2\pi m_0)^{1/2} = 1.6 (2\pi \cdot \frac{H_{rms}^2}{8})^{1/2} = \quad (3.5)$$

$$H_{1/3} = 1.418 H_{rms}$$

De lo anterior se concluye que el parámetro $P_{\mathcal{L}_s}$ al calcularlo con la raíz media cuadrática (H_{rms}) es alrededor del doble del valor de $P_{\mathcal{L}_s}$ calculado con $H_{1/3}$

En el cálculo de $P_{\mathcal{L}_s}$, no es común utilizar $H_{1/3}$ en la línea de rompiente, pues la medición y el cálculo de los oleajes generalmente se efectúa en altamar. Por lo que $P_{\mathcal{L}_s}$ se expresa con las características del oleaje como a continuación se indica.

Figura 3.4 Transmisión de la potencia de la ola



En la fig. 3.4 si la energía del oleaje transportándose por el ancho b_w de la cresta se expresa como $w a b_w$, al no haber cruce de la energía del oleaje entre ortogonales se puede obtener la siguiente ecuación:

$$b_a w_a = b_b w_b \quad (3.6)$$

Haciendo operaciones resulta:

$$w_b = \frac{b_a}{b_b} w_a = K_r^2 w_a = K_r^2 \left(\frac{P_a}{B} (H_{1/3})^2 C_g \right)_a \quad (3.7)$$

Donde K_r , corresponde al coeficiente de refracción entre A y B, pudiendo expresar la ecuación (3.4) como:

$$P'_a = \sum w_b \cdot \sin \alpha_b \cdot \cos \alpha_b \quad (3.8)$$

$$= \sum K_r^2 \left(\frac{P_a}{B} (H_{1/3})^2 C_g \right)_a \cdot \sin \alpha_b \cdot \cos \alpha_b$$

Para utilizar la ec. (3.8) es necesario calcular el coeficiente de refracción K_r y el ángulo de rompiente de cada oleaje, no resultando necesario calcular la altura del oleaje rompiente.

Ecuaciones del transporte litoral a lo largo de la costa.

Se han realizado numerosos intentos para correlacionar las características de la acción del oleaje, de los sedimentos, en la cantidad del transporte litoral, pieza básica de todo proyecto costero.

En 1956, Cadwell, a partir del análisis de los volúmenes de arena atrapados por espigones en la costa californiana (U.S.A.), le permitieron conocer el transporte litoral con cierta exactitud. Posteriormente, muchos han sido los investigadores que han seguido analizando el tema.

En la tabla 3.1, se presenta una lista de las ecuaciones más representativas para calcular el transporte litoral a lo largo de la costa.

Tabla 3.1 Lista de ecuaciones representativas para el cálculo del transporte litoral a lo largo de la costa.

| INVESTIGADOR | FORMULA $Q(m^3/d/a)$ P_B (Ton-m/día/m) | BASES DE LA FORMULACION |
|--|---|--|
| Caldwell (1956) | $Q = 1.21 P_B^{0.8}$ | Sur de la boca del lago Worth Florida. ($d=0.3 - 0.7$ mm) Bahía Anaheim, California $d=0.3 - 0.5$ mm; $H_{o\max} = 3.5$ ft $T=11.5-17$ seg. |
| Savage (1959) | $Q = 0.217 P_B^{0.5}$ | Varios datos de campo y laboratorio |
| Ijima, Sato, Aono y Ishii (1960) | $Q = 0.130 P_B^{0.54}$ | Costa de Fukue en Japón ($d=1-2$ mm, $H_y=1$ m, $T=2-4$ seg) |
| Ichikawa, Ochiai, Tamita y Morobuse (1961) | $Q=0.131 P_B^{0.30}$ | Bahía Suruga, Tagosaura en Japón ($d=5-4$ mm, $\tan \alpha = 1/5$) |
| Manoha (1962) | $Q=0.786 P_B^{10.91} d^{0.59}$ | Varios datos de campo y laboratorio |
| Ijima, Sato y Tanaka (1964) | $Q = 0.3 P_B^{0.5}$ | Costa de Kashima en Japón ($d=0.15-0.20$ mm, $H_y=4$ m) |
| C.E.R.C. (1975) | $Q = 0.401 P_B^{0.5}$ | Datos de campo por Komar Caldwell y Watts. |

1V MODELACION DE LA TEORIA DE UNA LINEA.

4.1 Ecuación básica de la teoría de una línea.

Considerando el eje x paralelo a la línea de costa y el eje y perpendicular a la misma, la ecuación de continuidad del movimiento de arena a lo largo de la costa se puede expresar como sigue:

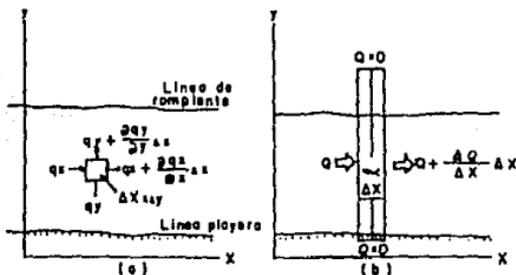
$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \quad (4.1)$$

Donde:

- h : Profundidad del punto (x,y)
- q_x : Cantidad del movimiento de arena en la dirección x por la unidad de tiempo.
- q_y : Cantidad del movimiento de arena en la dirección y por unidad de tiempo.
- t : Tiempo.
- λ : Relación de vacíos de la arena.

La ecuación (4.1) indica que la suma de la cantidad de arena que sale en la dirección x , y en la dirección y a través del área $\Delta x \cdot \Delta y$ por unidad de tiempo, es igual al aumento de la profundidad de la misma área por unidad de tiempo, como se muestra en la figura 4.1 (a)

Figura 4.1 Sistema Coordenado de la ecuación de continuidad de la arena en movimiento.



Si se considera con exactitud los valores de q_x y q_y , se estaría en posibilidad de predecir los cambios del fondo del mar. Sin embargo, las formulas para cuantificar q_x y q_y en la zona de rompientes, no han sido suficientemente establecidas. Por lo tanto se considera el elemento $\Delta x, \Delta z$ como se muestra en la figura 4.1 (b), donde ambos términos en la dirección del eje y, se prolongan lo necesario para que el valor de q_y sea cero.

En la figura 4.1 (b) se observa que la cantidad de arena por unidad de tiempo que entre en el elemento $\Delta x, \Delta z$ a través de la longitud l se define como Q , y la cantidad de arena que sale de la misma área se puede expresar como $-Q + (\frac{\partial Q}{\partial x}) \Delta x$. Por lo tanto, el aumento de la cantidad de arena en un determinado tiempo Δt dentro del área $\Delta x, \Delta z$ se puede determinar con la siguiente ecuación.

$$\Delta V = Q \Delta t - (Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x) \Delta t \quad (4.2)$$

$$\Delta V = \frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x \Delta t \quad (4.3)$$

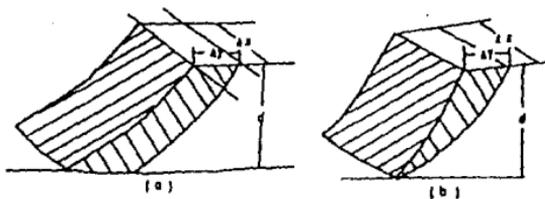
Dónde:

ΔV es el Volúmen de arena depositado dentro del área $\Delta x, \Delta z$.

Dado que se desconoce como la arena se deposita dentro del área $\Delta x, \Delta z$ en la zona de rompientes, recurriendo nuevamente al modelo de caja negra resulta necesario hacer una suposición respecto a la forma de depósito de la arena.

Las suposiciones consideradas se muestran en la figura 4.1 (a) y (b).

Figura 4.2 Suposición de la depositación de arena en la playa.



En la suposición (a), la arena se deposita y se erosiona uniformemente dentro del elemento en cuestión, manteniendo la siguiente relación:

$$\Delta v = d \cdot \Delta y \cdot \Delta x \quad (4.4)$$

Donde:

d: Distancia vertical entre el punto de máxima elevación del oleaje sobre la cara de la playa y el fondo del mar donde la profundidad casi no cambia.

Δy : Desplazamiento hacia el mar de la línea de playa.

Sustituyendo la ecuación (4.3) en la ecuación (4.4) se tiene:

$$d \cdot \Delta y \cdot \Delta x = -\frac{\Delta Q}{\Delta x} \cdot \Delta x \cdot \Delta t \quad (4.5)$$

$$\therefore \frac{\Delta y}{\Delta t} = -\frac{1}{d} \frac{\Delta Q}{\Delta x} \quad (4.6)$$

Por otro lado, en la suposición de la figura 4.2 (b) la arena no se deposita uniformemente, siendo inversamente proporcional a la profundidad. De acuerdo a la siguiente relación:

$$\Delta v = \frac{1}{2} d \cdot \Delta y \cdot \Delta x \quad (4.7)$$

Sustituyendo la ecuación (4.3) en la ecuación (4.7) queda:

$$\frac{1}{2} d \cdot \Delta y \cdot \Delta x = -\frac{\Delta Q}{\Delta x} \Delta x \Delta t \quad (4.8)$$

$$\therefore \frac{\Delta y}{\Delta t} = -\frac{2}{d} \frac{\Delta Q}{\Delta x} \quad (4.9)$$

De esta manera, las ecuaciones (4.6) y (4.9) son utilizadas para el cálculo del transporte de arena a lo largo de la costa y serán utilizadas en el presente trabajo para predecir los cambios de la línea de costa.

4.2 Interpretación del ángulo de oleaje incidente.

4.2 Interpretación del ángulo del oleaje incidente.

Para evaluar el volúmen de transporte litoral a lo largo de la costa, se hace uso de la siguiente ecuación:

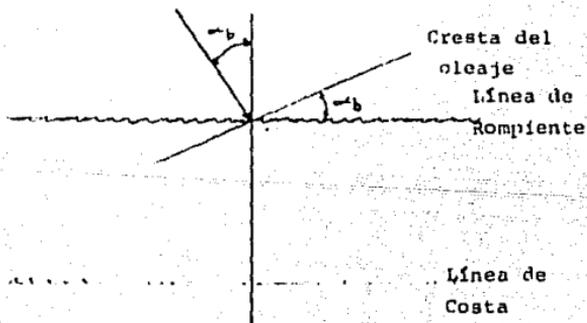
$$\begin{aligned} Q &= K p l a \\ P l a &= (E C_g)_b \cdot \gamma \operatorname{sen} 2 \alpha_b \\ E &= \frac{\gamma}{8} (H l / 3)^2 \end{aligned} \quad (4.10)$$

Donde:

- E: Energía total del oleaje
- Hl/3: Altura del oleaje significante.
- γ : Peso específico del agua de mar.
- Cg: Celeridad de grupo.
- b: Indica que indica el punto de rompiente.
- α_b : Angulo del oleaje incidente
- K: Coeficiente de proporcionalidad (varia de 0.1 - 0.5)

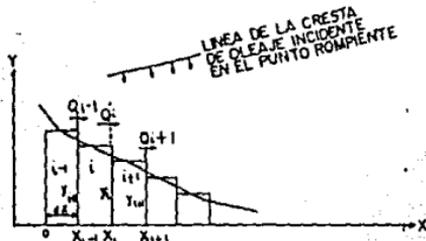
Para poder utilizar la ecuación (4.10) el ángulo del oleaje incidente considerado debe de establecerse entre la línea de la cresta del oleaje y la línea de playa en la rompiente, como se muestra en la fig. 4.3

Fig. 4.3 Definición del ángulo de oleaje incidente.



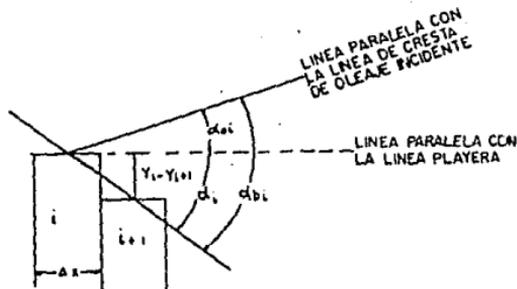
En el cálculo por computadora, la línea de playa se divide en pequeños elementos de una longitud Δx como se indica en la figura 4.4, donde la cantidad de transporte litoral que pasa del elemento i al elemento $i+1$, se define como Q_i .

Fig. 4.4 División de la línea de playa.



La determinación del ángulo α_b al realizar el cálculo de Q_i se expresa a continuación con ayuda de la figura 4.5

Fig. 4.5 Definición del ángulo de oleaje incidente.



El ángulo α_{oi} es el ángulo entre la línea de la cresta del oleaje incidente y el eje x , el ángulo α_i formado entre los elementos i e $i+1$ se define por las siguientes ecuaciones:

$$\tan \alpha_i = \frac{Y_i - Y_{i+1}}{\Delta x} \quad (4.11)$$

$$\therefore \alpha_i = \tan^{-1} \frac{(Y_i - Y_{i+1})}{\Delta x} \quad (4.12)$$

Entonces el ángulo α_{bi} se determina por la suma de los ángulos α_{oi} y α_i .

$$\alpha_{bi} = \alpha_{oi} + \alpha_i \quad (4.13)$$

4.3 Oleajes.

El parámetro más importante en la teoría de una línea es la dirección del oleaje incidente, dado que la dirección del transporte de arena a lo largo de la costa depende por completo de esto y una posición en equilibrio de la línea de costa se establecerá bajo la condición de que el ángulo de incidencia del oleaje en el punto de rompiente con respecto a la playa sea cero en toda la zona de estudio. Se debe tener cuidado al decidir el ángulo incidente en la zona de rompientes. Los parámetros que siguen en importancia son la altura de ola y período, con los cuales se puede estimar la potencia de la energía del oleaje.

Si se cuentan con datos sobre las características del oleaje, período del oleaje, altura y dirección, representativas pueden ser determinados de la siguiente manera:

4.3.1. Período representativo del oleaje (\bar{T})

El período representativo \bar{T} del oleaje se puede estimar con la siguiente ecuación:

$$\bar{T} = \frac{1}{n_k} \sum_{k=1}^{n_k} T_k \quad (4.14)$$

donde T_k ($k=1, 2, \dots, n_k$) es una serie de datos de tiempo de período del oleaje, por ejemplo durante 2 hrs., n_k es el número total de datos.

4.3.2 Altura de ola representativa (\bar{H})

La altura de ola representativa \bar{H} se puede estimar con la ecuación -- (4.15) tomando en cuenta el flujo de energía.

$$\bar{T} \cdot \bar{H}^2 = \frac{1}{n_k} \sum_k T_k \cdot H_k^2 \quad (4.15)$$

donde H_k es una serie de datos de alturas de ola en un determinado tiempo y (T_k, H_k) es una muestra del mismo oleaje.

En la ecuación (4.15) el lado derecho puede ser calculado con los datos obtenidos en campo, y el \bar{T} en el término del lado izquierdo será calculado mediante la ecuación (4.14). Entonces podremos obtener el valor de \bar{H} .

4.3.3. Dirección del oleaje representativo ($\bar{\alpha}$)

La dirección del oleaje representativo en los puntos de observación, se estima con las ecuaciones (4.16 - 4.18) tomando en cuenta las componentes del flujo de energía, de la costa y hacia el mar la componente del flujo se calcula con la siguiente ecuación.

$$F_1 = \frac{1}{n_k} \sum_{k=1}^{n_k} T_k H_k^2 \cos \alpha_k \quad (4.16)$$

a lo largo de la costa la componente del flujo de energía esta dada por:

$$F_2 = \frac{1}{n_k} \sum_{k=1}^{n_k} T_k H_k^2 \sin \alpha_k \quad (4.17)$$

$$\tan \bar{\alpha} = \frac{F_2}{F_1} \quad \text{ó} \quad \bar{\alpha} = \tan^{-1} (F_2/F_1) \quad (4.18)$$

donde, (T_k, H_k, α_k) es una suposición del mismo oleaje.

Si las características del oleaje (especialmente en la dirección) es diferente de estación en estación, es necesario calcular el oleaje caracte

ristico (\bar{H} , \bar{T} , \bar{K}) por cada estación. En el caso de que las características del oleaje sean casi constantes en un año, tendremos una suposición de (\bar{H} , \bar{T} , \bar{K}).

En el caso de no contar con datos de oleaje, el período, altura y dirección del oleaje se considerará de acuerdo con las experiencias del investigador o ingeniero que esté realizando el estudio.

4.3.4. Topografía.

Para calcular la deformación del oleaje, la batimetría es fundamental para obtener la longitud y celeridad del oleaje.

Para este propósito se podrán obtener datos batimétricos de carta de navegación, también llamados portulanos.

Es necesario contar con información sobre los cambios de la línea de costa en el pasado, ya que en la teoría de una línea, se realizan muchas suposiciones y las condiciones de simulación generalmente no son correctas. Por lo tanto, lo más importante en cuanto a la teoría de una línea es confirmar la aplicabilidad de este modelo de acuerdo con los objetivos buscados, y comparando los cambios de la línea de costa en el pasado con los cambios calculados. Si se encontraran diferencias entre el cálculo de los cambios de la línea de costa y los cambios en el pasado se deberá de modificar las condiciones de simulación.

La modificación en la simulación mediante la teoría de una línea es usualmente en el ángulo de incidencia del oleaje.

4.3.5 Extensión del Área de simulación.

Si la longitud de la costa es muy grande, es imposible cubrir toda el área en la simulación del modelo. Resultando difícil decidir las fronteras sobre la playa. En éste caso se deberá elegir la frontera en el lugar donde la línea de costa es estable en largo tiempo.

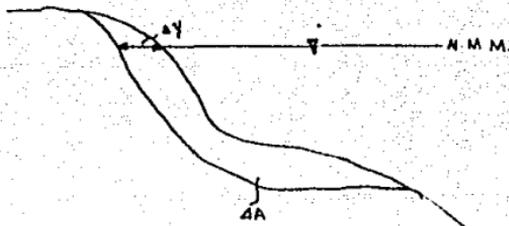
En el caso que se seleccione la frontera en el lugar donde la línea de costa es inestable, se deberá estimar el valor del transporte a lo largo de la costa OE. Además, se evitará que la situación que causa los efectos de frontera lleguen al lugar donde se necesitan predecir los cambios de la línea de costa.

4.3.6. Distancia Vertical "D"

El mejor método para decidir el valor de "D", es utilizando datos de campo de los cambios de perfiles playeros, la forma como se determina se muestra en las figuras 4.6 y 4.7

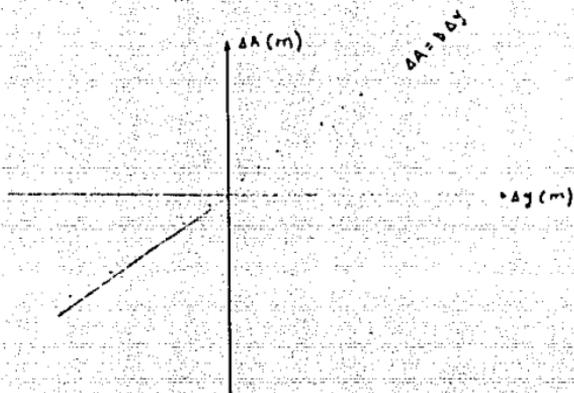
La figura 4.6 muestra la comparación de perfiles playeros durante diferentes tiempos.

Fig. 4.6 Comparación de 2 perfiles levantados en diferentes tiempos.



El cambio del perfil, erosión o azolvamiento se muestra en la figura 4.6. Ésta área puede ser calculada como ΔA . El cambio de la línea de costa referido al nivel medio del mar puede calcularse como Δy . Si se realizara este cálculo sobre todas las secciones que inciden en el área de simulación, obtendría como resultado una figura como la mostrada en la figura 4.7

Fig. 4.7 Relación entre A y Δy



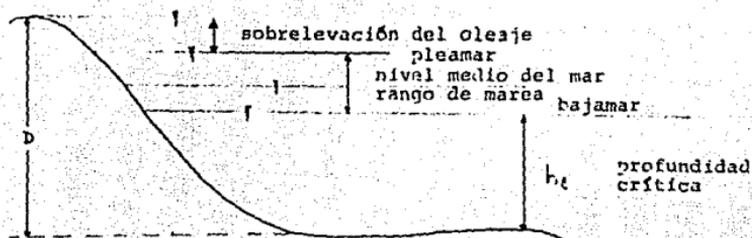
De la figura 4.7 se podrá obtener por mínimos cuadrados la siguiente ecuación:

$$A = D \cdot \Delta y \quad (4.19)$$

Donde D es un coeficiente constante correspondiente a la distancia vertical D .

Si no se cuenta con datos sobre perfiles playeros, la profundidad crítica del cambio del fondo del mar y la sobrelevación del oleaje sobre la playa, se puede estimar como la diferencia vertical D . La profundidad vertical esta referida al nivel de Bujamar y la sobrelevación esta referida a el nivel de Pie de mar, como se muestra en la figura 4.8

Fig. 4.8 Definición de la profundidad crítica y de la sobrelevación del oleaje.



En ausencia de datos de campo se podrán utilizar los siguientes criterios para estimar la profundidad crítica:

- Ecuación de Sato y Tanaka.

$$\frac{\bar{H}}{L} = 2.4 \left(\frac{d}{L} \right)^{1/3} \left(\sin h \frac{2\pi hc}{L} \right) \left(\frac{H_0}{\bar{H}} \right) \quad (4.20)$$

- Ecuación de Swart.

$$\frac{hc}{L} = 0.0063 \exp \beta \quad (4.21)$$

$$\beta = 4.347 \frac{\bar{H}^{0.473}}{d^{0.894} L^{0.093}}$$

- Ecuación de Rector.

$$\frac{hc}{L} = 3.5 \left(\frac{\bar{H}}{L} \right) \left(\frac{d \times 10^4}{L} \right)^{-0.75} \quad (4.22)$$

- Ecuación de Hallermeier.

$$hc = (2.28 - 10.9 \frac{\bar{H}}{L}) \bar{H} \quad (4.23)$$

$$\text{Sinh} \left(\frac{2 \pi hc}{L} \right) = \frac{\pi^2 (H_s - 0.3 \sigma)^2}{\rho_B (\rho_f - 1) T_B^2 d} \quad (4.24)$$

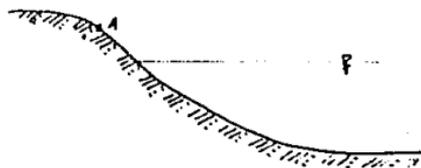
Donde:

- \bar{H} : Altura de ola media
- \bar{T} : Período del oleaje medio
- g : Aceleración de la gravedad
- d : Diámetro medio de la arena
- hc : Profundidad crítica
- L : Longitud de ola en la profundidad crítica
- H_s : Altura de ola significativa anual
- σ : Desviación estandar de la altura de ola significativa en un año.
- ρ_B : Densidad de la arena
- ρ_f : Densidad del agua de mar.

En el cálculo de la profundidad crítica utilizando las ecuaciones (4.20) a (4.24), se obtendrán diferentes resultados, por lo que deberán considerarse tales resultados de acuerdo con la experiencia.

El mejor método para decidir el valor de la sobrelevación del oleaje es ir a la playa e inspeccionar sobre esta el nivel de la elevación correspondiente al punto A del perfil de playa esquemático mostrado en la fig. 4.9, correspondiendo esta elevación a la sobrelevación real de la zona de estudio.

Fig. 4.9 Sobrelevación del oleaje esquemático en el campo.



ecuaciones:

- Ecuación de Rector.

$$\begin{aligned} \frac{R}{L} &= 0.18 \left(\frac{H}{L} \right)^{0.5} & \text{en } \frac{H}{L} < 0.018 \\ &= 0.24 & \text{en } \frac{H}{L} \geq 0.018 \end{aligned} \quad (4.25)$$

- Ecuación de Hallermeler

$$\begin{aligned} \left\{ \frac{2 \pi R}{L} \right\} \sin h^2 &= \frac{2 \pi R}{L} \tan h \frac{2 \pi R}{L} \\ &= \frac{\pi^2 (H_s + 5.6 \nabla)^2}{0.03 \left(\frac{P_s}{P} - 1 \right) \left(\frac{R T_s}{2 \pi} \right)^2} \end{aligned} \quad (4.26)$$

- Ecuación de Swart

$$\begin{aligned} \frac{R}{d} &= 7664 - 7706 \exp A \\ A &= -0.000143 \frac{H}{d} \frac{0.0488 \bar{T}}{0.93} \end{aligned} \quad (4.27)$$

- Ecuación de Hunt

$$\frac{R}{H} = \tan \beta \sqrt{H/L} \quad (4.28)$$

Donde:

R : Sobrelevación del oleaje.

Tan β : Pendiente de la cara de la playa.

De igual manera que la profundidad crítica, el valor de la sobrelevación del oleaje al utilizar las ecuaciones (4.25 a 4.28) se deberá de decidir de acuerdo a la experiencia.

4.3.7. Coeficiente en la ecuación de transporte de arena a lo largo de la costa.

La ecuación general de transporte de arena a lo largo de la costa está dada por:

$$Q = \alpha p \left(\sin \alpha b \cos \alpha b - c \frac{\partial H_b}{\partial x} \cot \beta \cos \alpha b \right) \quad (4.29)$$

Los valores de α y C se pueden considerar como 0.4 y 1.6 respectivamente. Sin embargo, estos deberá de determinarse en la playa de interés mediante mediciones de campo, para establecer la ecuación de transporte de arena a lo largo de la playa de interés. Dado que estas mediciones son costosas y requieren de cierto tiempo. Estos valores se modificarán tratando de reproducir la línea de costa de acuerdo con los cambios que la playa de interés hay sufrido en el pasado.

Al expresar la ecuación básica de la teoría de una línea como:

$$\frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{1}{D} \frac{\Delta Q}{\Delta x} \quad (4.30)$$

Y sustituyendo la ecuación (4.29) en la ecuación (4.30), se obtiene:

$$\frac{\Delta y}{\Delta t} = -\frac{\alpha}{D} \frac{d}{dx} p \left(\sin \alpha b \cos \alpha b - c \frac{\partial H_b}{\partial x} \cot \beta \cos \alpha b \right) \quad (4.31)$$

4.3.8 Longitud de las celdas x a lo largo de la costa.

Con el fin de realizar un ahorro en el tiempo de cálculo, lo mejor es colocar la longitud de la celda x a lo largo de la costa lo mas grande que sea posible. En el caso de querer predecir los cambios de la línea de costa alrededor de estructura de protección como una norma general se debe considerar las siguientes recomendaciones:

$$\Delta x = 100 \sim 200 \text{ m}$$

Para una simple configuración de la línea de costa.

$$\Delta x = 10 \sim 50 \text{ m}$$

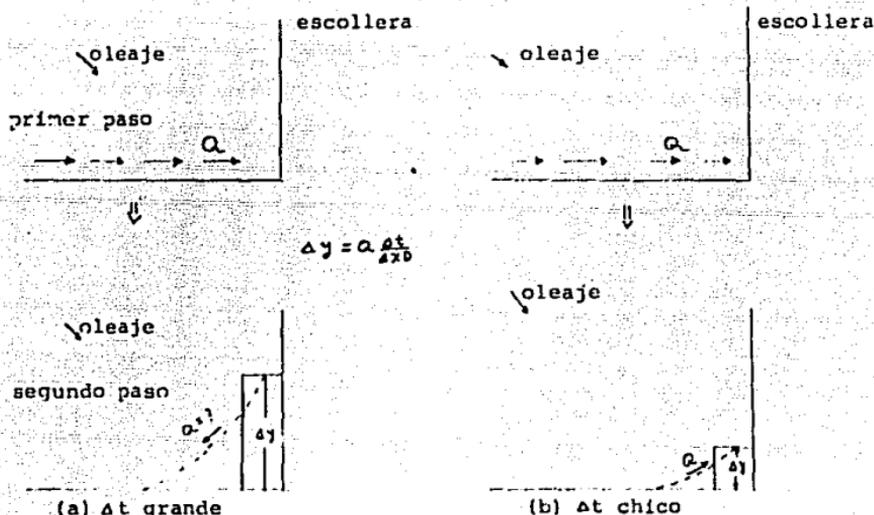
$$\text{ó } l_j/10 \text{ m}$$

Para cambios de la línea de costa alrededor de las estructuras.

Donde l_j es la distancia a lo largo de la costa entre rompeolas.

Al considerar el incremento de tiempo t , si se tomara un incremento de tiempo t grande se obtendrá un resultado inestable como el mostrado en la figura 4.10 (a)

Fig. 4.10 Efecto de Δt en los cambios de la línea de costa.



Para evitar esta situación inestable, en el cálculo se deberá de definir un incremento de tiempo t bastante chico.

De todo lo anteriormente señalado se puede concretar que toda la información necesaria para llevar a cabo la simulación de las deformaciones de la costa utilizando la teoría de una línea, se deberá contar con la información mostrada en la tabla NO. 1

TABLA 1 INFORMACION NECESARIA PARA LA TEORIA DE UNA LINEA.

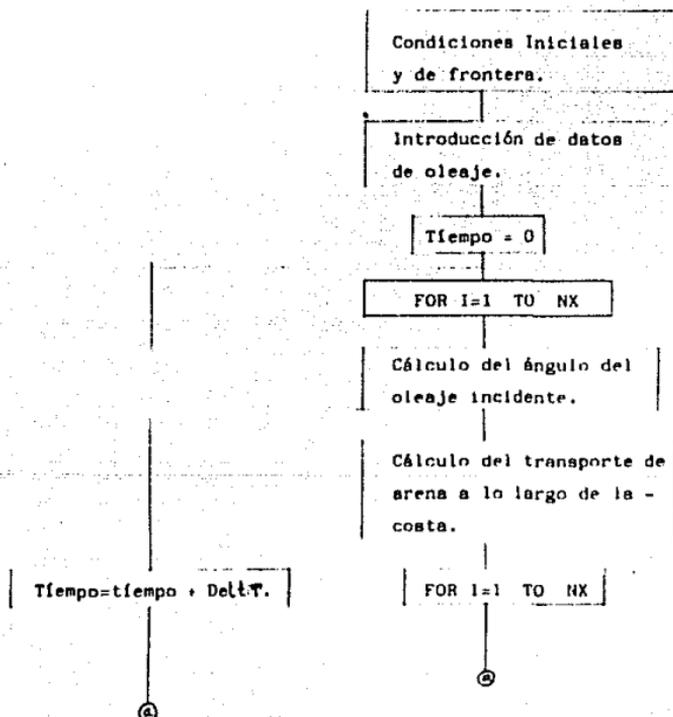
| PARAMETROS | C O N C E P T O S | EN TEORIA DE UNA LINEA |
|------------------------------------|---|---|
| Datos de Oleaje mínimo un año. | Altura de Ola, Períodos y Direcciones en un Período de tiempo mayor a un año. | Altura, Período y Dirección representativos del oleaje. |
| Niveles | Nivel promedio, Nivel máximo, Nivel bajo. | Para D |
| Topografía. | Topografía del área de estudio. Información de perfiles de playa. | Cálculo de la deformación del oleaje para D |
| Línea de costa. | Información de los cambios de la línea de costa en estudio. | Para la verificación de la aplicabilidad de la teoría de una línea. |
| Transporte litoral. | Dirección anual y estacional del transporte litoral predominante a lo largo de la costa. | Para definir la dirección representativa del oleaje. |
| | Información sobre la relación entre el transporte de arena a lo largo de la costa y los oleajes. | Por una fórmula del transporte de arena a lo largo de la costa. |
| Estructura construidas en la playa | Información de la localización, año y mes de construcción de estructuras, tales como rompeolas, malecones, espigones y -- rompeolas separados de la costa. Información de rellenos artificiales de arena y depósitos de arena en la playa. | Por el cálculo de la deformación del oleaje, para la modificación del transporte de arena a lo largo de la costa. Para modificar la posición de la línea de costa. |
| Río. | Localización, ancho de la boca del río y volumen de arena descargada a la playa. | Para QR |
| Arena. | Diámetro representativo de la arena. | Por la comprensión de la forma general de la playa. |

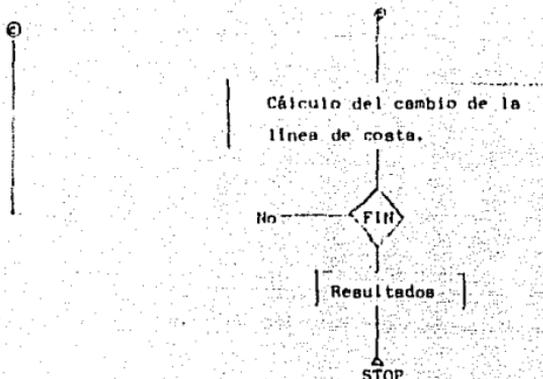
V APLICACION DEL MODELO DE LA TEORIA DE UNA LINEA
EN UNA PLAYA RECTILINEA.

5.1 Composición del Programa.

Tomando en cuenta todos los parámetros del oleaje y características de la costa y las ecuaciones del movimiento de la arena, se puede integrar un programa de computadora para el cálculo de la evolución de la línea de costa.

En forma general a continuación se muestra el diagrama de flujo del -- programa que permite el cálculo de la evolución de la línea de costa.





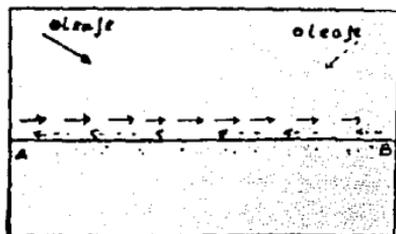
5.1 Diagrama de flujo del Programa de computadora para el cálculo de la evolución de la línea de costa.

Utilizando este programa se estará en posibilidad de conocer el comportamiento de la línea de costa en presencia de estructura de protección como - aplicación del programa de computadora antes mencionado, se ponen los siguientes datos iniciales; para un caso ideal.

| | |
|-------------------------|--|
| $\Delta T = 0.1$ años | Incremento de tiempo |
| $D = 5$ m. | Profundidad. |
| $Q = 6.8 \times 10^3$ | Transporte litoral a lo largo de la costa. |
| $\Delta X = 25$ m. | Longitud de la costa |
| $Q_w = 2.5 \times 10^3$ | Gasto de material sólido que descarga el río hacia el mar. |

5.1) En una playa natural recta sin la presencia de estructuras de protección, la línea de costa no cambia manteniéndose uniforme. Por lo tanto, en el área de simulación, en las condiciones de frontera se considera que el volumen de material transportado tanto en la entrada como en la salida es constante como se muestra en la figura 5.1

Figura 5.1 Playa Natural rectilíneas dentro del área de simulación.

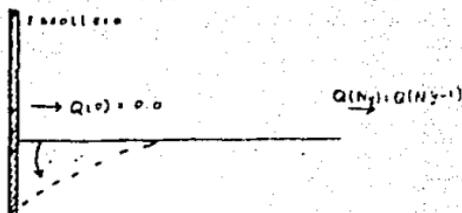


De esta manera se puede establecer que $Q_A = Q_B$, esto es muy importante, lo cual significa que la línea de costa no cambiará en el área de simulación a lo largo de la playa.

En la aplicación práctica de la teoría de una línea, para encontrar los cambios de la línea de costa, se usarán ambos lados de las fronteras en las situaciones donde hay un límite definido como por ejemplo una escollera, un rompeolas, etc., en donde $Q = 0$. Para casos donde se requieran manejar diferentes condiciones de frontera, la relación $Q_A = Q_B$ deberá de cambiarse.

a) En el caso de que este una escollera en el lado izquierdo del área de simulación, el lado contrario de la playa será erosionada y la línea de costa retrocederá como se muestra en la figura 5.2 con una línea punteada.

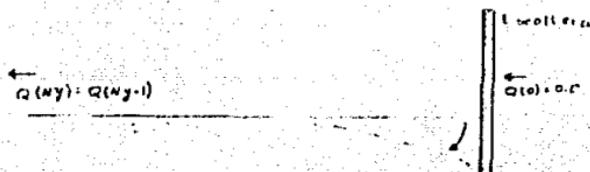
Figura 5.2 Escollera colocada en el lado izquierdo del área de simulación.



En la figura 5.2, se puede observar que el gasto de material transportado en el inicio del área de simulación es igual a cero, pero en toda la demás área de simulación continua con el gasto de material transportado.

De esta manera las condiciones de frontera para el caso donde se coloque una escollera en el lado derecho del área de simulación serán las mismas que las mostradas en la fig. 5.2, pero se deberá de cambiar el sentido del oleaje incidente como se muestra en la fig. 5.3

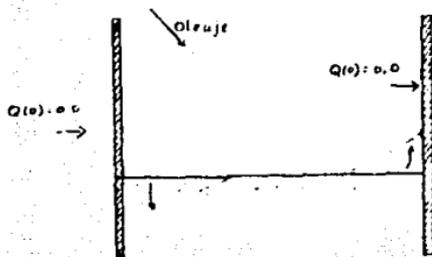
Figura 5.3 Escollera colocada en el lado derecho del área de simulación con ángulo Inc. negativo.



utilizando estas condiciones de frontera y colocando una escollera en el lado derecho y otra escollera en el lado izquierdo del área de simulación con una incidencia del oleaje en el sentido positivo, la línea de costa cambiará como se muestra en la fig. 5.4

Figura 5.4

Dos escolleras colocadas en ambos lados del área de simulación.



En donde las condiciones de frontera serán:

$$Q(NY) = 0,0$$

$$Y(I) = (I) = ((Q(I-1) - Q(I))) * DELT * D \quad (3)$$

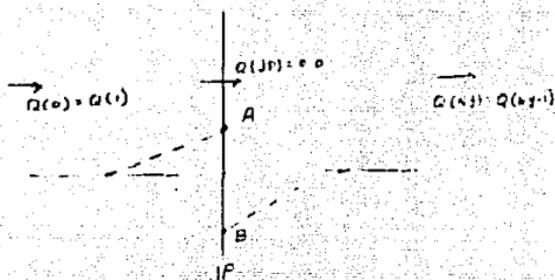
La condición de frontera de la ecuación (3) es válida también para un caso inverso en la dirección de la incidencia del oleaje.

Cuando un rompeolas es construido dentro del área de simulación como se muestra en la figura 5.5, la línea de costa cambiará en ambos lados de la estructura como se muestra con la línea punteada. En este caso se pueden obtener resultados de cambios de la línea de costa con la combinación de un rompeolas en el lado derecho y uno en el lado izquierdo del área de simulación. Sin embargo tratando de predecir el cambio de la línea de costa en ambos lados al mismo tiempo. Como no hay transporte de arena a través de estos rompeolas, se establece que:

$$Q(JP) = 0,0 \quad (4)$$

Donde JP es un entero correspondiente al punto de construcción del rompeolas.

Figura 5.5 Rompeolas colocado al centro del Área de simulación.



Por lo tanto, la línea de costa en el caso de la figura 5.5 puede ser predecido por la siguiente rutina:

$$Q(0) = Q(1) \quad (4)$$

$$Q(JP) = 0.0 \quad (5)$$

$$Q(NY) = Q(NY-1) \quad (6)$$

FOR I = 1 TO NY

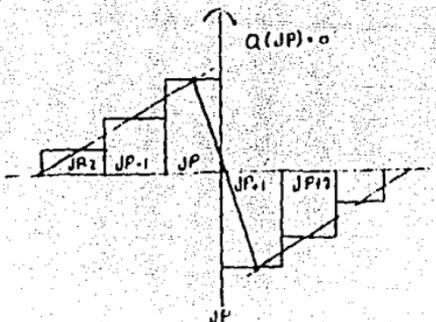
$$Y(I) = Y(I) + (Q(I-1) - Q(I)) * DELTXD$$

NEXT I

Como sabemos, las condiciones de frontera de las ecuaciones (4) y (6) indican que la línea de costa en estos dos puntos no cambia. Entonces estas ecuaciones serán válidas hasta el tiempo cuando el efecto del rompeolas llegará a estos dos puntos.

Los cambios de la línea de costa pueden ser predecidos por la rutina anteriormente señalada. Sin embargo, se tendrá el problema cuando se quieran graficar los resultados. En otras palabras, como se puede ver en la figura 5.5, la línea de costa, será discontinua en la dirección a lo largo de la costa. Hay dos puntos de la línea de costa (A y B en la fig. 5.5) situados sobre JP. Si se dibujara la línea de costa basada sobre los datos de Y(I), obtendríamos la figura 5.6 como teniendo que complementar éste dibujo con trazos a mano

Figura 5.6 Problema en el dibujo de la línea de costa.



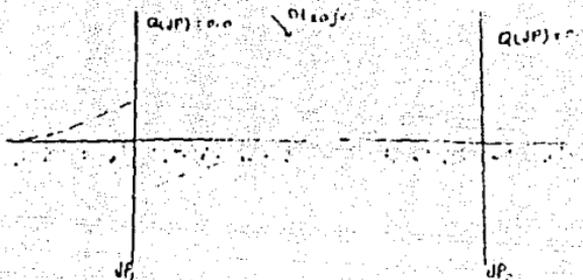
Esto puede ser un problema mas relacionado a la rutina del "Cálculo del ángulo del oleaje incidente" y "Cálculo del transporte de arena a lo largo de la costa", como se muestra en la figura 5.6. El gradiente de la línea de costa en el punto JP , se cálcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\alpha_{JP} = \tan^{-1} \left(\frac{J_{R2} - J_{R1}}{J_{P1} - J_{P2}} \right) \quad (7)$$

Utilizando la ecuación (7), el transporte de arena podrá ser cálculado. En el caso de la fig. 5.6, una gran cantidad de arena es transportada a la derecha, através del rompeolas. Sin embargo no hay problema puesto que el valor de la cantidad de arena que passa através de la estructura será nula, como lo muestra la ecuación (5).

Cuando dos rompeolas son construidos dentro del área de simulación como se muestra en la fig. 5.7, la línea de costa alrededor de los rompeolas cambiará como se muestra con líneas punteadas. En este caso se pueden predecir los cambios de la línea de costa de la misma manera como se realizó en el ejemplo anterior.

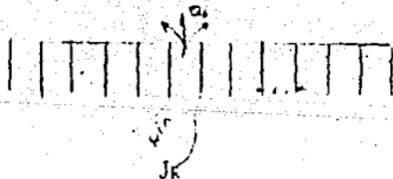
Figura 5.7 Dos rompeolas dentro del área de simulación.



Cuando exista la necesidad de colocar varios rompeolas dentro del área de simulación los cambios de la línea de costa se pueden obtener colocando una variable (N_r) que será el número de rompeolas a colocar y otra variable JP (J) que determina el punto de ubicación del rompeolas.

Si existe la desembocadura de un río en el área de simulación se puede considerar el volumen de arena descargada por el río, como se muestra en la fig. 5.8.

Figura 5.8 Efecto de un río dentro del área de simulación.



Solo una parte de arena descargada por el río puede contribuir a la formación de la playa alrededor de su boca, denotando el volumen de arena por la letra QR y considerando que el ancho de la boca del río es igual al ancho de una celda AX , la localización de la boca del río corresponderá con la celda JR . Puesto que el valor de QR se desprestará debido a la presencia del oleaje,

suponiendo el efecto de QR como se muestra en la fig. 5.9

Figura 5.9 Efecto de la boca del río en el primer paso de simulación.



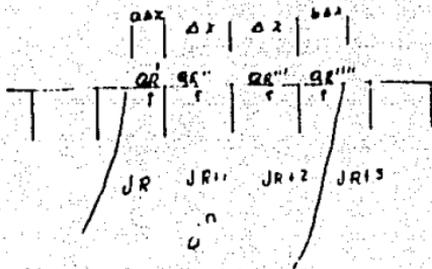
Δy de la fig. 5.9, se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\Delta y = QR \cdot \Delta t / (\Delta x \cdot d) \quad (10)$$

En el siguiente paso, la arena depositada enfrente de la boca del río puede ser transportada en ambas direcciones puesto que existe un gradiente de la línea de costa a medida que aumenta la cantidad de material como se muestra con línea punteada en la figura 5.9

En el caso en el que la boca del río es del ancho de varias celdas Δx , como se muestra en la figura 5.11, se consideran para el cálculo de los cambios de la línea de costa las siguientes ecuaciones:

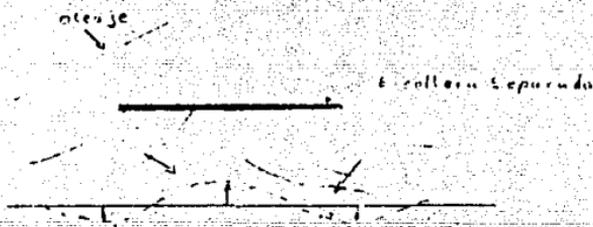
Figura 5.11 Caso general de la desembocadura de un río



$$\begin{aligned}
 QR &= QR' + QR'' + QR''' + QR'''' \\
 QR' &= \frac{2}{(a+2+b) \Delta x} \Delta x \quad QR = \frac{1}{a+2+b} QR \\
 QR'' &= \frac{\Delta x}{(a+2+b) \Delta x} \quad QR = \frac{1}{a+2+b} QR \\
 QR''' &= \frac{\Delta x}{(a+2+b) \Delta x} \quad QR = \frac{1}{a+2+b} QR \\
 QR'''' &= \frac{\Delta x}{(a+2+b) \Delta x} \quad QR = \frac{1}{a+2+b} QR
 \end{aligned} \tag{13}$$

Cuando una escollera separada es construida en el área de simulación, se presentará el caso como se muestra en la fig. 5.12.

Figura 5.12 Oleaje difractado por efecto de la escollera separada.



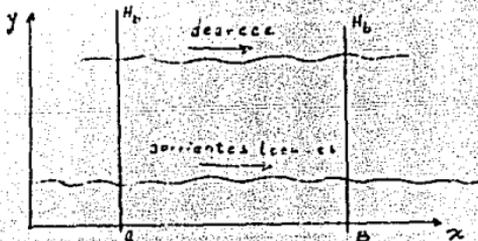
Sin embargo, la altura y el ángulo del oleaje detras de la escollera separada estará cambiando de un lugar a otro debido a la difracción del oleaje

el cual deberá ser calculado con una rutina independiente del programa de la teoría de una línea. Es decir la altura de ola y el ángulo del oleaje incidente no son constantes en la dirección a lo largo de la costa.

De la misma manera si el oleaje incide normalmente a la costa, la corriente local a lo largo de la costa es generada como se muestra en la fig. 5.13. En la figura 5.13, el oleaje incide normal y las corrientes locales existirán en la dirección del punto A a punto B y del punto C al punto B, el cual producirá transporte de arena local a lo largo de la costa. En algunos casos el transporte de arena local será una causa del cambio local de la línea de costa. Por lo tanto se deberá de tomar en cuenta dentro de las corrientes locales a lo largo de la costa, el cual no depende del ángulo de incidencia - del oleaje pero depende de las variaciones de altura del oleaje en la dirección a lo largo de la costa.

Este efecto se puede observar en la figura 5.13 la cual es una vista en planta. Observándose que la altura del oleaje fuera de zona de rompiente decrece de la línea C a la línea B y la dirección de la corriente local a lo largo de la costa se mueve de la línea C a la línea B.

Figura 5.13 Vista en planta de corrientes locales a lo largo de la costa.



Como la corriente local a lo largo de la costa transportará la arena en la misma dirección como se muestra en la fig. 5.13, se puede deducir la siguiente relación.

$$Q_{\text{local}} \llcorner - P \frac{\partial H_b}{\partial x} \quad (16)$$

Donde P es el flujo de energía incidente en el punto de rompiente.

Cuando el oleaje incide con un ángulo α b en el punto de rompiente, con respecto a la costa la corriente local a lo largo de la costa se genera de la línea de costa hacia mar a fuera. Entonces podemos considerar las componentes hacia fuera de la costa en la ecuación (16), haciendo uso de la siguiente expresión.

$$Q_{\text{local}} \llcorner - P \frac{\partial H_b}{\partial x} \cdot \cos^{\alpha} b \quad (17)$$

De acuerdo con la derivación teórica la cual no se mostrará aquí, Q local además depende de la pendiente de la playa de la siguiente manera.

$$Q_{\text{local}} \llcorner C \cdot P \cdot \frac{\partial H_b}{\partial x} \cdot \frac{1}{\tan \beta} \cdot \cos^{\alpha} b \quad (18)$$

Donde C es una coeficiente constante positiva y $\tan \beta$ es la pendiente de la playa.

Nuevamente, cuando el oleaje incide con un ángulo α b en el punto de rompiente con respecto a la playa, los componentes a lo largo de la costa, en un tiempo la costa producirá un transporte de arena local. Por lo tanto la forma general de la razón del transporte de sedimentos esta dado por:

$$Q = \llcorner P (\sin \alpha b \cdot \cos^{\alpha} b - C \cdot \frac{\partial H_b}{\partial x} \cdot \cot \beta \cdot \cos^{\alpha} b) \quad (19)$$

Donde \llcorner y C son constantes y dependen de las condiciones de la playa. Los valores usados comunmente para \llcorner y C son, 0.4 y 6.5 respectivamente.

Considerando que la altura del oleaje es constante ($\frac{\partial H_b}{\partial x} = 0$) en la dirección a lo largo de la costa, la ecuación (19) se reduce a:

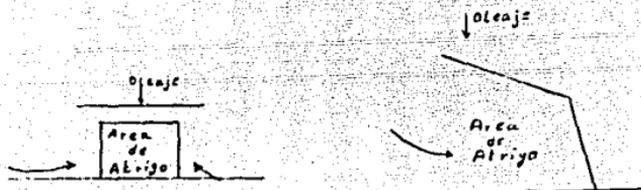
$$Q = \rho C P \sin^2 \theta + \cos^2 \theta b$$

$$Q = \rho P a \quad (20)$$

La ecuación (20) es usada comunmente para transporte de arena a lo largo de la costa.

Cuando el transporte de arena local debido a los cambios de la altura del oleaje incidente en la dirección a lo largo de la costa, se muestra en la fig. 5.14 (a) y (b). En este caso la arena será transportada dentro del área de abrigo del oleaje incidente.

Figura 5.14 Area protegida del oleaje incidente.



a) Rompeolas separado de la costa.

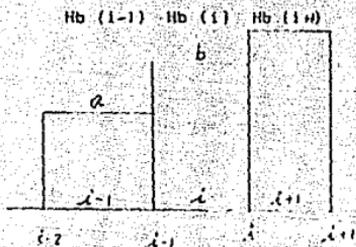
b) Rompeolas unido a la costa.

Este transporte de arena es debido a las corrientes a lo largo de la costa, las cuales dependen de los cambios del ángulo incidente difractado. Las corrientes a lo largo de la costa, dependen de los cambios del oleaje incidente originado por la difracción generada por las estructuras.

Finalmente la rutina para calcular el valor de $\frac{\partial H_b}{\partial x}$, se explica en la fig. 5.15. Si las alturas del oleaje en los puntos de a y b son denotadas

por H_a y H_b , el valor de $\partial H_b(i)/\partial x$, sobre la línea i , se cálcula con la ecuación (21).

Figura 5.15 Cálculo de $\partial H_b(i)/\partial x$



$$\frac{\partial H_b(i)}{\partial x} = \frac{H_b - H_a}{\Delta x} \quad (21)$$

Los valores de H_a y H_b pueden ser cálculados de acuerdo con las siguientes ecuaciones.

$$\begin{aligned} H_a &= \frac{1}{2} (H_b(i-1) + H_b(i)) \\ H_b &= \frac{1}{2} (H_b(i) + H_b(i+1)) \end{aligned} \quad (22)$$

realizando una combinación de ecuaciones (21) y (22) se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_b(i)}{\partial x} &= \frac{1}{\Delta x} \left\{ \frac{1}{2} (H_b(i) + H_b(i+1)) - \frac{1}{2} (H_b(i-1) + H_b(i)) \right\} \\ &= \frac{1}{\Delta x} \left\{ \frac{1}{2} H_b(i+1) - \frac{1}{2} H_b(i-1) \right\} \\ &= \frac{1}{2\Delta x} \left\{ H_b(i+1) - H_b(i-1) \right\} \end{aligned} \quad (23)$$

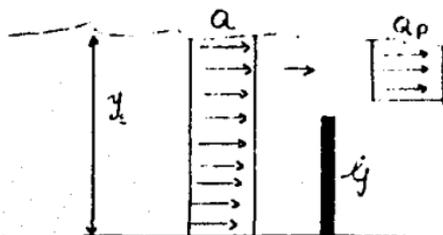
En el caso en que la longitud del rompeolas sea relativamente corta y no pase la zona de rompiente, se realizan las siguientes consideraciones:

Primeramente, se puede estimar el volumen de arena que pasa alrededor del morro del rompeolas Q_p .

$$Q_p = \omega \cdot Q \quad (0 \leq \omega \leq 1.0) \quad (24)$$

Donde Q es el transporte de arena a lo largo de la costa en una zona lejos del rompeolas. Un método simple para estimar es asumir la uniformidad de la distribución del transporte de arena a lo largo de la costa y hacer afuera de esta, como se muestra en la fig. 5.16. En este caso, solo la arer correspondiente al área de calma será transportada alrededor del morro del rompeolas.

Figura 5.16 Distribución uniforme del transporte de arena a lo largo de la costa.



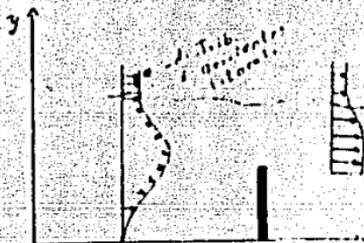
Entonces se tendrá:

$$Q_p = \frac{y_s - L_j}{y_s} \cdot Q \quad (2)$$

donde y_s es el ancho de la zona de rompiente, de la línea de costa al pi de rompietas, y L_j es la longitud del rompeolas. Si se asume que el de la arena transportada es proporcional a la velocidad de las corriente introduciendo la teoría de la distribución de corriente hacia fuera de línea de costa desarrollada por Longuet-Higgins, se obtendrá otra ecuación

estimar Q_p de acuerdo a la fig. 5.17.

Figura 5.17 Distribución de corrientes litorales, de acuerdo por Longuet-Higgins.



La distribución de velocidades de las corrientes litorales hacia fuera de la línea de costa, obtenida por Longuet-Higgins, se expresa como sigue:

$$V = \begin{cases} B_1 y^{P_1} + A y^1 & 0 < y < 1 \\ B_2 y^{P_2} & 1 < y < \infty \end{cases} \quad (26)$$

En donde V es la velocidad a lo largo de la costa, y es la distancia hacia afuera de la costa.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base a lo discutido en los capítulos del presente trabajo, se puede establecer lo siguiente:

El estudio de los procesos costeros, y particularmente los cambios -- que sufre la línea de costa, previamente a la construcción de un puerto o -- una estructura de protección costera, es básico para el proyectista o el investigador, puesto que en base a ésta determinará la longitud óptima de -- las diversas estructuras de protección costera, basándose en estudios previos del medio físico, tales como, seccionamientos playeros, batimetrías, -- control de la línea de costa ya sea mediante mediciones directas o mediante información plasmada en fotografías aéreas, mediciones de oleaje y corrientes, así como de las capacidades del transporte de sedimentos de ríos que -- descargan hacia el mar.

Tomando como base lo anterior, el proyectista o investigador podría -- proceder a la investigación y estudio de los procesos costeros mediante Modelos Físicos o Modelos Numéricos, pudiendo hechar mano de Modelos Numéricos tales como el de una línea, dos líneas y el tridimensional.

Cabe mencionar que la utilización del algoritmo numérico (modelo de -- la teoría de una línea) mostrado en el presente trabajo es relativamente de fácil utilización, no obstante presenta la dificultad de predecir los cambios de la línea de costa para cada condición en particular, si el operador del mismo, carece de conocimientos acerca de los fenómenos del transporte -- litoral en sus muy particulares condiciones, ya que como fue discutido, varía si está presente la descarga de un río hacia el mar, la presencia de un espigón, dos espigones o si se presenta la localización de estructuras separadas de la costa, etc.

Como todo modelo, el desarrollado aquí, presenta la necesidad de contar con información de campo para su calibración y posterior aplicación en la predicción, como se puede constatar en numerosos reportes presentados en

diversos congresos de Ingeniería Marítimo-Portuaria en el mundo.

Cabe mencionar, que el fenómeno del transporte litoral se encuentra actualmente en el mundo en desarrollo, por lo tanto los resultados obtenidos - en los diversos ejemplos desarrollados están condicionados a esta circunstancia, resultando necesario complementar el modelo numérico, haciendo intervenir los fenómenos del oleaje tales como su irregularidad, así como los inducidos por éste (refracción, efectos de fondo, rompiente, difracción, reflexión y efectos del fondo).

No obstante, la utilización del modelo numérico de una línea mostrado en el presente trabajo, se recomienda utilizarlo como preliminar en aquellos casos en que se quiera contar con información general de los cambios de la misma en el futuro, debiéndose corroborar con ensayos en modelo hidráulico.

Asimismo se recomienda continuar con la aplicación concreta a casos específicos, ya que se considera que las aplicaciones realizadas en el presente trabajo, son el inicio (el planteamiento) de su utilización en México.

REFERENCIAS

- 1.- SATO,S.:Azolvamiento del puerto.Texto para el primer curso latinoamericano de capacitación en Ingeniería Hidráulica. Portuaria.
- 2.- SATO,S.: Erosion de la costa y sus contramedidas.Texto para el primer curso latinoamericano de capacitación en Ingeniería Hidráulica Portuaria.
- 3.- MONTOYA RODRIGUEZ,J.M.: Texto para el primer curso latinoamericano de capacitación en Técnicas Hidráulicas Portuarias,organizado por la Dirección General de Obras Maritimas y la Japan International Cooperation Agency.
- 4.- KATO,K.: Numerical Simulation and Analysis on Litoral Drift.Curso para el proyecto del Centro Hidráulico Portuario,Dirección General de Obras Maritimas y la Agencia de Cooperación Internacional del Japon.
- 5.- SATO,S.: Propiedades Generales y Modelo Hidráulico del Movimiento de Arena. Texto Vol.7 para el proyecto del Centro Hidráulico Portuario de México. Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- 6.- KRAUS NICHOLAS,C.: Applications of A Shoreline Prediction Model. Tokio Japan.