

MODELO DE SEDIMENTACION
EN CANALES DE NAVEGACION

Angel N. Menéndez
Laboratorio de Hidráulica Aplicada (LHA)
INCYTH

RESUMEN

En este trabajo se presenta un modelo para simular numéricamente los procesos de sedimentación debido a la acción de las corrientes y las olas, incluyendo tanto el transporte de sedimento en suspensión como el de fondo. Está basado en un modelo hidrodinámico paramétrico y un modelo de transporte por advección y difusión turbulenta bidimensionales en corte. El primero está representado por ecuaciones diferenciales ordinarias, cuya resolución es directa. El segundo está basado en una ecuación diferencial parabólica, que se discretiza usando el método de los elementos finitos. Se muestran resultados de pruebas y ensayos numéricos y su aplicación al puerto de Bahía Blanca.

ABSTRACT

A numerical procedure to simulate sediment transport due to current and wave actions, including both suspended and bed load, is presented. It is based on a two-dimensional parametric hydrodynamic model and a sediment transport model with advection and turbulent diffusion. The former is described by a set of ordinary differential equations, which resolution is straightforward. The transport model is based on a parabolic differential equation that is discretized using finite elements. Results of tests and numerical experiments are shown, together with their application to Bahía Blanca harbour.

INTRODUCCION

El dragado de mantenimiento de canales de navegación es una actividad tan necesaria como costosa, por lo cual es importante estimar con relativa precisión la oportunidad de efectuar esos dragados. El proceso de sedimentación está influenciado por una diversidad de factores físicos. Aunque el grado de conocimiento actual respecto de los fenómenos involucrados es incompleto, resulta suficiente para formular modelos predictivos que, aunque elaborados y de operación costosa, resultan rentables debido a la utilidad de los resultados proporcionados.

Un modelo de predicción de sedimentación (y/o erosión) está estructurado en tres bloques:

- i) Un modelo hidrodinámico.
- ii) Un modelo de transporte de sedimentos sobre el fondo.
- iii) Un modelo de transporte de sedimentos en suspensión.
- iv) Un modelo de evolución del lecho.

En este trabajo se describe una metodología para simular completamente el proceso de sedimentación/erosión que se produce en canales de navegación, y se presentan resultados de su aplicación.

MODELO HIDRODINAMICO

La descripción completa de la hidrodinámica significa que, idealmente, deberían resolverse las ecuaciones de Navier-Stokes en tres dimensiones espaciales. Sin embargo, la adopción de hipótesis simplificativas, las cuales no alteran la esencia del problema, permite edificar un modelo más tratable, en el sentido de su posibilidad de procesamiento con las computadoras existentes en la actualidad.

En primer lugar, se supondrá que la geometría de la forma de fondo es de tipo longitudinal, y que su sección transversal varía suavemente en la dirección de su eje. Estas características se corresponden, en particular, con un canal de navegación. Siendo así, puede efectuarse un análisis bidimensional en corte. El plano de análisis se hace coincidir con el alineado con la corriente. Sobre ese plano es necesario conocer el perfil vertical de ambas componentes de la velocidad (horizontal y vertical), la distribución de la tensión de corte contra el fondo y el perfil vertical del coeficiente de mezcla turbulenta.

Por otro lado, dado que las variaciones del nivel del fondo debido al proceso de sedimentación se producen sobre escalas de tiempo largas comparadas con las hidrodinámicas, puede suponerse que las condiciones hidrodinámicas se adaptan instantáneamente a esos cambios.

Teniendo en cuenta, además, que se modelarán extensiones mucho menores que la longitud de onda de la marea, el régimen de las corrientes puede considerarse como cuasi-permanente. El oleaje, por su parte, solo se considerará a través de su acción efectiva media sobre un periodo.

Para describir la distribución vertical de la componente horizontal de la velocidad (eje x), se plantea la siguiente familia paramétrica de funciones [1] :

$$u(x,z) = [A_1(x) \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) + A_2(x) F(\eta)] u_h(x) \quad (1)$$

donde z es la coordenada vertical medida desde el fondo, z_0 la altura del punto de velocidad cero ($z_0 \cong k_s/30$, donde k_s es la altura efectiva de rugosidad), u_h la velocidad en superficie, A_1 y A_2 constantes locales (independientes de z) y η la coordenada vertical adimensional

$$\eta = \frac{z - z_0}{h - z_0} \quad (2)$$

siendo $h(x)$ la profundidad local. La función $F(\eta)$ se expresa como

$$F(\eta) = 2 \eta^t - \eta^{2t} \quad (3)$$

donde t es otra constante local.

Este perfil está totalmente determinado si se conocen A_1 , A_2 , t y u_h . Las dos primeras constantes no son independientes entre sí, ya que están relacionadas por la condición $u(z=h)=u_h$. Otra relación entre A_1 , t y u_h surge de imponer que el caudal que atraviesa la sección de control es un valor conocido Q . Una tercera ecuación resulta de la observación hecha por van Rijn [1] de que la velocidad u a media profundidad ($z=h/2$) es aproximadamente igual a la velocidad de equilibrio (perfil puramente logarítmico) en ese punto. De estas relaciones surgen dos valores de t , cada uno de los cuales da lugar a una familia distinta de perfiles. Una corresponde a perfiles "desacelerados" (velocidad superficial u_h mayor que el valor de equilibrio u_{ho}) y la otra a perfiles "acelerados" ($u_h < u_{ho}$). Para completar la formulación del modelo es necesario dar una ecuación de evolución de alguno de los parámetros básicos. van Rijn propone la siguiente ecuación para la velocidad superficial [1]:

$$\frac{d u_h}{dx} = \alpha_1 \frac{u_{ho}}{h} - \alpha_2 \frac{u_h}{h} - \alpha_3 \frac{u_h}{b} \quad (4)$$

donde la coordenada x crece en el sentido de la velocidad u_h , b es el ancho del volumen de control y los coeficientes se expresan por medio de fórmulas obtenidas por calibración en base a datos de mediciones. La Ec. (4) se resolvió mediante un método de Runge-Kutta de cuarto orden, partiendo del valor inicial de equilibrio local u_{ho} .

La Fig. 1 muestra la evolución de la velocidad superficial u_h cuando se atraviesa un canal cavado en el fondo estudiado experimentalmente por van Rijn [1]. El perfil de velocidad horizontal asociado se presenta en la Fig. 2. Estos resultados muestran un buen acuerdo con los obtenidos experimental y teóricamente por van Rijn.

Conocido el perfil de la componente horizontal de la velocidad, la distribución de la componente vertical surge de integrar sobre la vertical la ecuación de continuidad

$$\frac{\partial(bu)}{\partial x} + \frac{\partial(bw)}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

donde z es la coordenada vertical.

Para el cálculo de la velocidad de corte se supone que el perfil es puramente logarítmico en las inmediaciones del fondo. Entonces,

$$u_* = \frac{\kappa u(\theta h)}{\ln\left(\frac{\theta h}{z_0}\right)} \quad (6)$$

donde κ es la constante de von Karman ($\kappa=0.41$) y θ es un valor pequeño (por ejemplo $\theta = 0.05$). La Fig. 3 muestra la distribución de la velocidad de corte para el problema de prueba. Se observa un acuerdo razonable con los valores experimentales.

El coeficiente de mezcla ϵ_s se construye como la superposición de dos componentes: una debida a la corriente y otra producida por las olas. También para estas variables se adoptan distribuciones paramétricas. El valor superficial del coeficiente de mezcla por corrientes tiene asociada una ecuación de evolución similar a la Ec. (4), la cual también se resolvió por medio de un método de Runge-Kutta de cuarto orden. Para la componente del coeficiente de mezcla debida a las olas no se plantea una

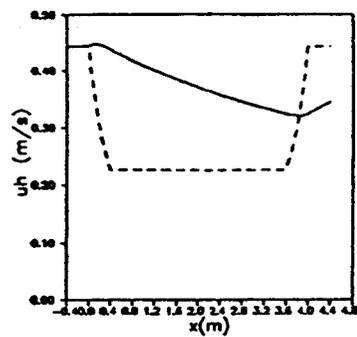


Figura 1.
Evolución espacial de la velocidad superficial;
- - - valor de equilibrio.

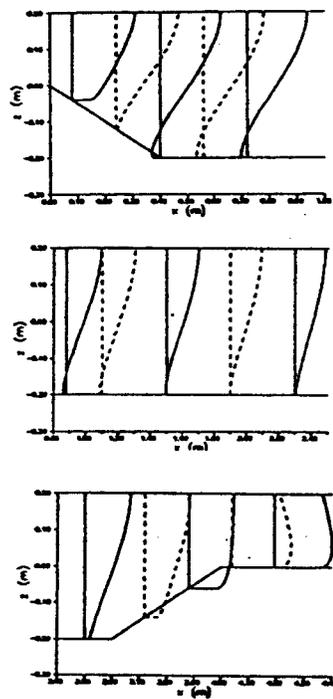


Figura 2.
Evolución espacial del perfil de la componente
horizontal de la velocidad.

ecuación de evolución, es decir que se considera que éste se ajusta inmediatamente a las condiciones locales. Esto es así mientras se trabaje sobre escalas de longitud mayores que la longitud de onda de las olas.

MODELO DE TRANSPORTE DE FONDO

Se dispone de una variedad de fórmulas de transporte de fondo para los casos en que las condiciones hidrodinámicas son de equilibrio local y en ausencia de olas. Cuando se producen variaciones bruscas en el fondo, como es el caso precisamente al atravesar la corriente un canal de navegación dragado, el perfil de velocidades vertical se aparta de las condiciones de equilibrio. De todos modos, dado que la escala de movimiento asociada al transporte de fondo es mucho menor que la hidrodinámica, puede considerarse que ese transporte se ajusta instantáneamente a las condiciones locales. Esto significa que no es necesario desarrollar una ecuación de evolución del transporte, sino simplemente una fórmula más general. van Rijn, asumiendo una distribución normal para la tensión de corte contra el fondo, desarrolló la siguiente fórmula [2]:

$$\frac{Q_{s,f}}{b d_{50} \sqrt{g d_{50}}} = 0.1 \sqrt{\Delta} \left[\frac{\Delta g}{\nu^2} d_{50} \right]^{-0.3} \frac{1}{T_m^{2.1}} \quad (7)$$

donde d_{50} es el diámetro medio del grano, Δ su densidad relativa, ν la viscosidad cinemática del fluido, g la gravedad y T_m el parámetro de estado, cuyo valor medio se expresa en términos de las tensiones de fondo críticas instantáneas para iniciación del movimiento y de la desviación estandar de la distribución estadística de la tensión de corte media contra el fondo. La Fig. 4 presenta la distribución de transporte sólido de fondo para el problema de prueba.

Para incluir el efecto del oleaje en la fórmula de arrastre solo es necesario considerar su influencia sobre la tensión de corte media, la cual se agrega por simple superposición [5].

MODELO DE TRANSPORTE EN SUSPENSION

Los mecanismos principales de transporte del sedimento en suspensión son la advección longitudinal (en la dirección de la corriente), la advección efectiva vertical y la difusión turbulenta según la vertical (Fig. 5). Esto se expresa matemáticamente en la siguiente ecuación [1]:

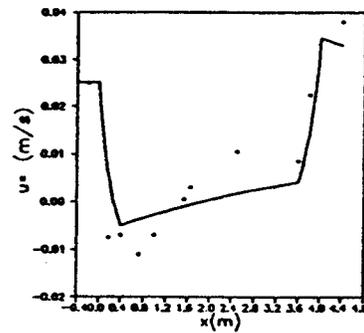


Figura 3.
Evolución espacial de la velocidad de corte;
x valores experimentales.

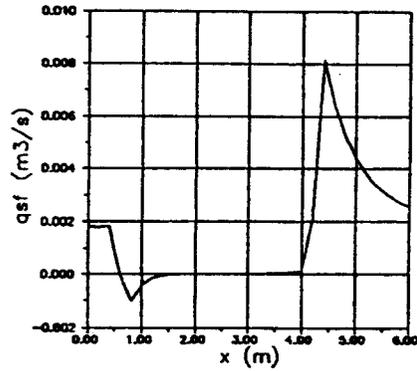


Figura 4.
Evolución espacial de la descarga de fondo.

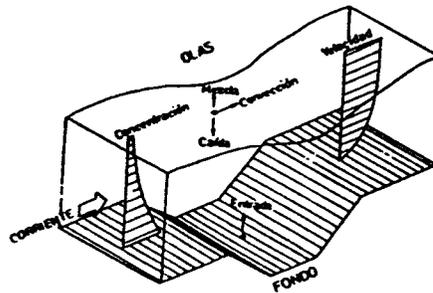


Figura 5.
Volumen de control para el balance
de sedimento en suspensión.

$$\frac{\partial}{\partial x} (buc) + \frac{\partial}{\partial \zeta} [b(w-w_s)c] = \frac{\partial}{\partial \zeta} (bc_s \frac{\partial c}{\partial \zeta}) \quad (8)$$

donde c es la concentración volumétrica de sedimento y w_s la velocidad de caída del sedimento.

La Ec. (8) es una ecuación diferencial de tipo parabólico para la función c , requiriendo condiciones de borde en el fondo, la superficie libre y la superficie de entrada del volumen de control. En la superficie libre se impone la condición de flujo de sedimento nulo:

$$c_s \frac{\partial c}{\partial \zeta} + w_s c = 0 \quad \text{en } \zeta = z_b + h \quad (9)$$

donde z_b es la cota del fondo. El fondo es, en realidad, la separación entre la zona de transporte de sedimento de fondo y en suspensión. Allí puede especificarse una condición tipo Dirichlet o tipo Neumann para la concentración c , es decir

$$c = c_a \quad \text{en } \zeta = z_b + a \quad (10)$$

o

$$-c_s \frac{\partial c}{\partial \zeta} = E_a \quad \text{en } \zeta = z_b + a \quad (11)$$

donde a es un nivel de referencia por sobre el lecho. El valor de c_a o el de E_a se expresan en términos similares a los del caudal sólido de fondo, Ec. (7).

En el borde entrante debe especificarse el perfil de la concentración. Allí se supone que las condiciones son de equilibrio local.

Conocida la distribución vertical de concentración de sedimento en suspensión, el caudal sólido volumétrico en suspensión se calcula como

$$Q_{s,s} = b \int_{z_b+a}^{z_b+a+h} u c d\zeta \quad (12)$$

El transporte total surge de sumar las contribuciones dadas por las Ecs. (7) y (12).

La Ec. (8), junto con las condiciones de contorno (9) y (10) u (11), debe ser resuelta numéricamente. Dado su carácter parabólico, puede implementarse un proceso de marcha en la dirección x . Además, como el dominio de resolución no es, en general, cilíndrico, es conveniente utilizar el método de los elementos finitos. Para ello, es

necesario replantear el problema en términos de una formulación débil.

Si $W(x, \zeta)$ es una función de peso, la formulación débil del problema es

$$\int_{x_0}^{x_f} dx \int_{b^+}^{z_b^+ + a + h} [W \frac{\partial}{\partial x} (buc) + W \frac{\partial}{\partial \zeta} [b(w - w_a)c] + b c_a \frac{\partial W}{\partial \zeta} \frac{\partial c}{\partial \zeta}] d\zeta + \mathfrak{J} = 0 \quad (13)$$

donde x_0 y x_f son los extremos del dominio de integración e \mathfrak{J} es la contribución de los bordes (fondo y superficie libre). Utilizando las condiciones de borde (9) y (11), esta contribución puede escribirse como

$$\mathfrak{J} = \int_{x_0}^{x_f} [W b w_a c \Big|_{\zeta=z_b^+ + a + h} + W b E_a \Big|_{\zeta=z_b^+}] dx \quad (14)$$

Si sobre el fondo, en lugar de la Ec. (11) se cumple la Ec. (10), ésta se impone como condición de borde geométrica y se suprime el segundo término de la Ec. (14).

La discretización se lleva a cabo sobre una malla de elementos finitos cuadrangulares con lados verticales. Como función de peso asociada a cada nodo, se elige la conformada por las funciones de forma correspondientes a ese nodo y a los elementos situados aguas arriba (método de Petrov-Galerkin). Esto significa introducir "upwinding".

La discretización provee, para cada columna ($x = \text{cte.}$), un sistema de ecuaciones algebraicas lineales de tipo tridiagonal, que es resuelto eficientemente por el algoritmo de eliminación para matrices tridiagonales. De esta forma se calcula la concentración de sedimento en suspensión, columna a columna, hasta completar el dominio de cálculo.

La generación de la red de cálculo se llevó a cabo utilizando el programa ENREDO, desarrollado en el Centro Atómico Bariloche (CNEA).

MODELO DE EVOLUCION DEL LECHO

La diferencia de transporte sólido total induce variaciones en el nivel del fondo. Planteando la continuidad del sedimento se obtiene

$$\frac{\partial(bz_b)}{\partial t} + \frac{1}{(1-p)} \frac{\partial Q_{a,f}}{\partial x} = 0 \quad (16)$$

donde p es la porosidad. Conocida la distribución longitudinal del gasto sólido, la Ec. (16) provee la variación de la cota de fondo. Esta se resolvió utilizando el método de Lax.

PRUEBAS DEL MODELO DE TRANSPORTE EN SUSPENSION

En primer lugar, se desarrollaron una serie de pruebas para verificar la correcta implementación del método de los elementos finitos. Para ello se particularizó la Ec. (8) imponiéndole coeficientes constantes. Como condición inicial ($x=0$) se adoptó una distribución en forma de pulso. La Fig. 6 muestra la comparación entre la solución numérica y la solución analítica cuando la advección horizontal es nula, para tres valores de x. El acuerdo es excelente.

Resultados para la ecuación completa se presentan en la Fig. 7. El acuerdo se considera satisfactorio, salvo cerca de los bordes ya que para la solución numérica se impusieron condiciones de Neumann homogéneas.

La segunda serie de pruebas consistió en calcular la longitud de ajuste del transporte de sedimento en suspensión a las condiciones de equilibrio, partiendo tanto de condiciones de defecto como de exceso de carga. Se tomó una red de cálculo rectangular, con un paso uniforme según x y una densificación logarítmica según ζ , con mayor densidad cerca del fondo. Para analizar las condiciones de defecto de carga, se partió de un perfil de concentración nula (en $x=0$). La Fig. 8 muestra la evolución del perfil en distintas posiciones x, y su tendencia hacia la concentración de equilibrio. También se simularon condiciones iniciales de sobrecarga, partiendo de una concentración uniforme e igual al valor de equilibrio en el fondo. Definiendo la longitud de ajuste como la distancia necesaria para alcanzar un perfil de concentración de sedimento en suspensión que no se aparte en más de un 5% del de equilibrio, se obtuvieron resultados concordantes con los de van Rijn [3].

ENSAYOS NUMERICOS CON EL MODELO TOTAL

En la primera serie de ensayos solo se consideró al transporte de fondo. En primer lugar, se calculó la evolución de un canal. La Fig. 9 muestra el perfil para distintos tiempos. Se observa que la "bajada" se traslada con velocidad uniforme (de alrededor de 1.2 m por día), permaneciendo el talud prácticamente inalterado salvo en los extremos, donde está suavizado. En cambio, la "subida" tiende a desparramarse mientras se traslada. Esto es típico de los procesos de convección-difusión no lineales.

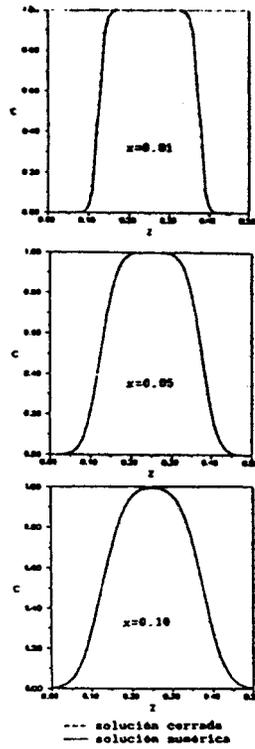


Figura 6.
Problema simplificado.
Advección nula.

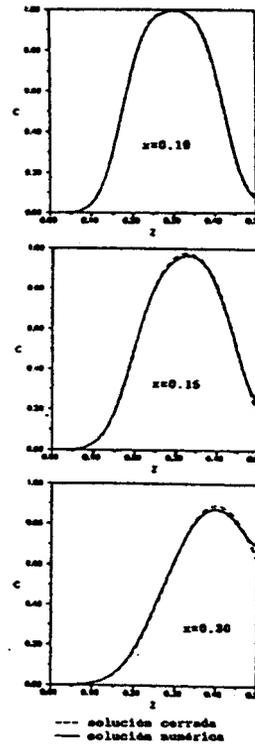


Figura 7.
Problema simplificado,
con advección.

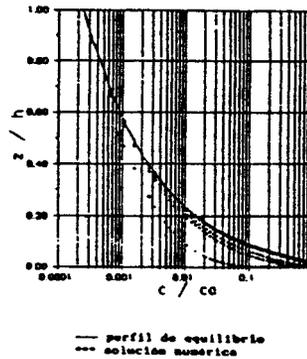


Figura 8.
Evolución espacial del perfil de
concentración hacia el equilibrio.

El segundo ensayo numérico consistió en seguir la evolución de una forma de fondo tipo campana. La Fig. 10 presenta los resultados para distintos instantes de tiempo. Se observa que la campana se difunde mientras se traslada con una velocidad de alrededor de 1 m por día.

Un tercer ensayo se efectuó sobre un canal similar al del primer ensayo, pero se hizo oscilar a la corriente, invirtiéndola cada 3 horas. La Fig. 11 muestra los resultados. Estos son típicos de un proceso de difusión. La Fig. 12 corresponde al mismo problema, pero incluye la acción del oleaje. Se observa que éste produce una mayor sedimentación en el canal, a costa de una mayor erosión de los taludes, es decir, incrementa el efecto de difusión.

En la segunda serie de ensayos se incluyó el transporte en suspensión. La Fig. 13 muestra la evolución de un canal sometido a una corriente permanente. Comparando con la Fig. 9, se observa que el canal actúa como una trampa para el sedimento en suspensión.

Finalmente, la Fig. 14 presenta perfiles calculados y medidos del canal de acceso al puerto de Bahía Blanca, en una zona que sufrió un fuerte proceso de sedimentación por los temporales ocurridos el 23 de marzo y el 17 de abril de 1990. Se observa que el modelo es capaz de explicar el fenómeno.

CONCLUSIONES

El modelo implementado se ha convertido en una herramienta eficaz para analizar la influencia que los diversos factores físicos tienen sobre el proceso de sedimentación en canales de navegación, y para cuantificar su dragado de mantenimiento. En particular, se lo está aplicando en los canales de acceso al puerto de Bahía Blanca, en el marco de la asistencia técnica que presta el LHA a la Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables en relación a los trabajos de ensanchamiento de esos canales que están llevando a cabo las empresas soviéticas Technoexport y holandesa Boskalis.

REFERENCIAS

- [1] van Rijn, L.C., "Mathematical modelling of morphological processes in the case of suspended sediment transport", Delft Hydraulics Communication No. 382, June 1987.
- [2] van Rijn, L.C., "Sedimentation of dredged channels by currents and waves", Jr. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, vol. 112, No. 5, September, 1986.
- [3] Menéndez, Angel N., "Sistemas computacionales para simular la sedimentación en canales de navegación", Informe LHA-INCYTH, en preparación.

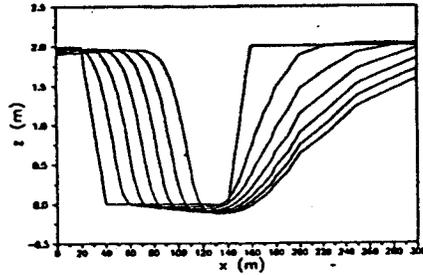


Figura 9.
Evolución temporal de una zanja.
Corriente permanente. Transporte
de fondo. Perfiles cada 10 días.

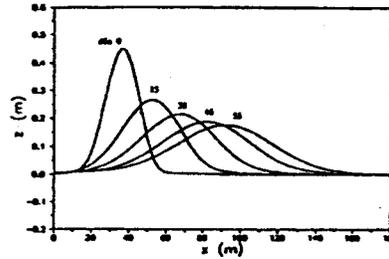


Figura 10.
Evolución temporal de protuberancia.
Corriente permanente.
Transporte de fondo.

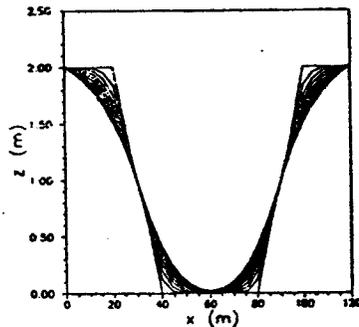


Figura 11.
Evolución temporal de una zanja.
Corriente oscilatoria. Transporte
de fondo. Perfiles cada 10 días.

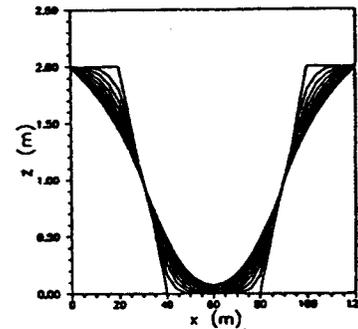


Figura 12.
Idem Fig. 11. Con oleaje.

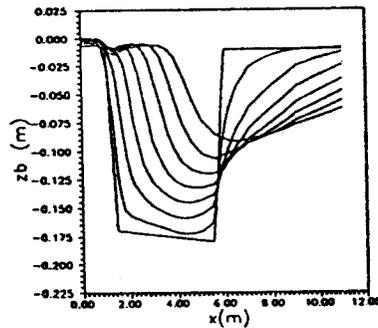


Figura 13.
Evolución temporal de una zanja.
Corriente permanente. Transporte
de fondo y en suspensión.
Perfiles cada 1/2 hora.

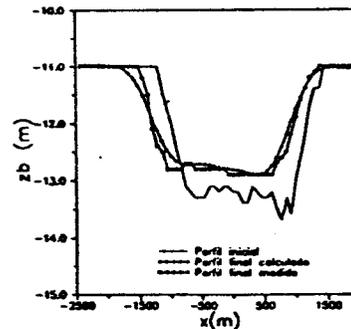


Figura 14.
Sedimentación en canal de navegación
por efecto de temporales.
Puerto de Bahía Blanca.

