

01173

10
23



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA**

**MODELO NUMERICO DEL TRANSPORTE
DE SEDIMENTO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERIA
(MECANICA)

P R E S E N T A :
MARTIN SALINAS VAZQUEZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. ALEJANDRO RODRIGUEZ V.



MEXICO, D. F.

JULIO DE 1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 esta 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.

A MI PADRE

**TU PARTIDA ME ENTRISTECIÓ
PERO TU RECUERDO ESTARÁ SIEMPRE EN MI CORAZÓN
Y TUS ENSEÑANZAS ME HARÁN MEJOR**

**A DIOS POR AYUDARME DÍA CON DÍA
A CELIA LA LUZ QUE ILUMINA MI VIDA
A MI MAMÁ QUE CON SU CARIÑO Y DEDICACIÓN HA SIDO
MI GRAN APOYO
A MIS HERMANAS Y AL RESTO DE MI FAMILIA
A ALEJANDRO Y ARTURO POR GUIARME POR EL
CAMINO DE LA INGENIERÍA**

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Sedimentación	1
1.1.2. Características del sedimento	2
1.1.3. Sedimento-flujo	3
1.1.4. Transporte de sedimento	4
1.1.4.1. Inicio del movimiento	4
1.1.4.2. Transporte de sedimento por arrastre de fondo	6
1.1.4.3. Transporte por suspensión	7
1.1.4.4. Nivel de referencia	10
1.1.5. Transporte de sedimento en equilibrio y no equilibrio	11
1.2. Objetivo de la tesis	13
1.3. Teoría	14
1.3.1. Ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos	14
1.3.1.1. Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento	14
1.3.1.2. Conservación de masa	16
1.3.1.3. Modelo de turbulencia	16
1.3.1.4. Ecuación de transporte de un escalar (concentración de sedimentos)	17
1.3.2. Ecuaciones semiempíricas	18
1.3.5.1. Obtención de la concentración C_b	18
1.3.5.2. Viscosidad en función de la concentración	18
1.3.5.3. Variación de la densidad en función de la concentración de sedimentos	19
1.4. Fundamentos del código numérico PHOENICS®	19
2. Modelo	24
2.1. Introducción	24
2.2. Transporte de sedimento por suspensión y acumulación de partículas en el fondo	24
2.3. Resuspensión de partículas	28
2.4. Transporte por arrastre de fondo	29
2.5. Condiciones iniciales y de frontera	33
2.5.1. Condiciones de frontera	33
2.5.1.1. Ecuación cantidad de movimiento	33
2.5.1.2. Ecuación conservación de masa	34
2.5.1.3. Modelo de la turbulencia	34
2.5.1.3.1. Energía cinética turbulenta	34
2.5.1.3.2. Rapidez de disipación turbulenta	35
2.5.1.4. Concentraciones del sedimento	35
2.5.2. Condiciones iniciales	36
3. Resultados	37
3.1. Comprobación del transporte por suspensión	37
3.1.1. Canal tridimensional	37
3.1.2. Sedimentador bidimensional	42
3.2. Resuspensión de partículas	45
3.3. Transporte por arrastre de fondo	47
4. Conclusiones	50
Referencias	52

Bibliografía	53
Apéndices	
Apéndice A	A-1
Apéndice B	B-1

SIMBOLOGÍA

Latinas

a	altura de referencia (m)
A	área transversal (m^2)
A	constante (ley logarítmica de pared)
B	constante (ley logarítmica de pared)
c_a	concentración de referencia para $y=a$ (m^3/m^3)
c_b	concentración del transporte por arrastre de fondo (m^3/m^3)
c_0	máxima concentración por arrastre (m^3/m^3)
C	concentración (m^3/m^3)
C	Chezy (en las ecuaciones empíricas de transporte)
C_D	coeficiente de arrastra (-)
C_m	concentración másica (mg/m^3)
C_v	concentración volumétrica (m^3/m^3)
C_1, C_2	constantes
C_3, C_μ	constantes
d_{50}	tamaño 50 de la partícula
e	factor de corrección
d D	diámetro de la partícula (m)
D	función de deposición de sedimento (kg/m^2s)
D_m	coeficiente difusivo de la concentración (m^2/s)
D^*	parámetro de la partícula (-)
E	función de reauspensión de sedimento (kg/m^2s)
E	parámetro (ley logarítmica de pared)
f	fuerza (N)
F	factor de forma
F_D	fuerza de arrastre (N)
F_G	fuerza gravitacional (N)
F_S	fuerza de flotación (N)
g	aceleración debido a la gravedad (m/s^2)
h	tirante (m)
k	energía cinética turbulenta (J)
k_e	constante
l_k	escala de Kolmogorov
m	masa (kg)
p	porosidad (-)
P	presión (Pa)
q_b	gasto transporte de arrastre de fondo (m^2/s)
q_s	gasto de sedimento (m^2/s)
Re	número de Reynolds
s	densidad específica (-)
S_a	fuerza (kg/s)
t	tiempo (s)
T	esfuerzo cortante sobrante (-)
u_b	velocidad de arrastre (m/s)
u_m	velocidad media (m/s)
u^*	velocidad de cortante (m/s)
u^*_{cr}	velocidad de cortante (m/s)
V	volumen
v	velocidad (m/s)
v_r	velocidad relativa (m/s)

\tilde{w}	intensidad turbulente vertical
w_s	velocidad de sedimentación (m/s)
x	coordenada
y	coordenada

Griegas

α	constante
β	ángulo de la pendiente del piso (rad)
δ_b	altura de salto en el transporte por errestre de fondo (m)
Δ	$(\rho_s - \rho_l) / \rho_l$ (-)
Δ	factor forma (ecuaciones empíricas de transporte de sedimentos) (m)
ϵ	dissipación de la energía cinética turbulente ($J^{1/2}$)
κ	constante de von Kármán (-)
ρ	densidad (kg/m^3)
τ_b	cortante en el piso (N/m^2)
$\tau_{b,cr}$	cortante crítico en el piso (N/m^2)
μ	viscosidad dinámica (Ns/m^2)
ν	viscosidad cinemática (m^2/s)
ν_{ref}	viscosidad cinemática de referencia ($\approx 1e-6$) (m^2/s)
ϕ	factor del efecto turbulento en las partículas en suspensión
σ	número de Schmith (-)
θ	Shields (-)
θ_{cr}	Shields crítico (-)
χ	constante

Subíndices

k	energía cinética turbulenta
l	líquido
s	sedimento
p	pared
e	dissipación de la energía cinética turbulenta

Superíndices

'	fluctuación
-	promedio o vector
.	d/dt
..	d ² /dt ²

RESUMEN.

Un modelo numérico sencillo que pueda simular lo mejor posible el transporte de sedimentos por corrientes, se implantó en el código numérico comercial PHOENICS, con el fin de aprovechar las ventajas de un modelo de tercera generación en el estudio del transporte de sedimento en ciertas estructuras hidráulicas.

El modelo considera varios fenómenos que ocurren en este tipo de problemas, esto es: el transporte por suspensión, el transporte por arrastre de piso, así como, el transporte en equilibrio y no equilibrio.

El transporte de sedimento por suspensión se basa en un enfoque totalmente conservativo por medio de fuentes y sumideros en el dominio computacional. Se considera que el sedimento en suspensión no afecta en forma determinante a la hidrodinámica, la cual se resuelve con las ecuaciones clásicas de conservación de cantidad de movimiento. Bajo este principio el sedimento se representa como una concentración, para la cual se resuelve una ecuación de transporte de un escalar para conocer su comportamiento.

Con esto, se evita el uso de modelos mucho más complejos, como los modelos eulerianos-lagrangianos y modelos bifásicos, que necesitarían de computadoras con mayor capacidad de procesamiento, mayor tiempo de cómputo, dificultad de convergencia, etc.

El transporte por arrastre de piso, se obtiene a partir del razonamiento de van Rijn para el cálculo del gasto de sedimento transportado como el producto de la velocidad del sedimento que se transporta por arrastre, la concentración y la altura con respecto al piso en la cual ocurre el fenómeno. Con este fin se recurren a ecuaciones semiempíricas para obtener estos parámetros. Una vez que se encuentra el gasto neto por arrastre en cada celda, se puede determinar para un tiempo específico los cambios morfológicos del piso a causa del movimiento de las partículas.

Para acoplar las ecuaciones de los diferentes transportes que comprende este fenómeno, se utilizan expresiones semiempíricas. Dichas expresiones son tomadas de la literatura, teniendo éstas, una validación a partir de una gran cantidad de datos experimentales.

El transporte vertical, tanto deposición como resuspensión, se trata de cuantificar a partir de un comportamiento conservativo de la concentración que representa al sedimento. Aunque un método alternativo es el uso de ecuaciones semiempíricas, como las llamadas *Pick-up functions*.

La calibración del modelo se realizó comparando los resultados obtenidos con datos experimentales medidos en prototipos; expresiones semiempíricas obtenidas en el análisis de gran cantidad de datos experimentales, y en algunas ocasiones comparando cualitativamente el comportamiento del fenómeno real con el simulado.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

1.1.1. Sedimentación.

La sedimentación es el conjunto de los procesos de erosión, resuspensión, deposición, transporte y compactación del sedimento. El sedimento está formado por fragmentos de material creados por la desintegración física y química de las rocas, teniendo distintos tamaños y formas caprichosas. Estos sedimentos están formados principalmente de cuarzo o minerales arcillosos.

Según el tipo de sedimento, pueden existir dos tipos de sedimentación:

-Sedimentación con floculación. La aglomeración de las partículas que se sedimentan realizan cambios en la densidad del sedimento. Sedimentos arcillosos bajo influencia de fuerzas electrostáticas (cohesivas) en un medio salino, se van aglomerando lo que incrementa el tamaño de *partícula* y con esto la velocidad de sedimentación. En el presente trabajo, este tipo de sedimento no se considera.

- Sedimentación discreta.- La cual se distingue, porque las partículas que se van sedimentando, guardan su individualidad y no se asocian con las de su entorno. Por esta razón, sus propiedades físicas no se alteran. Principalmente sucede con los sedimentos de cuarzo.

El fenómeno de la sedimentación discreta se explica a partir de la segunda ley de Newton. Si se considera a una partícula totalmente esférica que se va sedimentando, ésta se acelerará hasta que la fuerza de arrastre se iguale con el peso de la partícula. El resultado será que la partícula llegará a una velocidad constante o terminal, llamada velocidad de sedimentación.

El peso efectivo de la partícula está dada por la diferencia entre el peso menos la fuerza de flotación.

$$F_s = (\rho_s - \rho_l)gV \quad (1.1)$$

La fuerza de arrastre esta dada por:

$$F_D = \frac{1}{2}C_D A(\rho_L w_s^2) \quad (1.2)$$

donde C_D es el coeficiente de arrastre y $C_D = f(Re)$. Igualando F_s y F_D se obtiene que la velocidad de sedimentación está dada por:

$$w_s = \left[\frac{4}{3} \left(\frac{g}{C_D} \right) \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} d \right]^{1/2} \quad (1.3)$$

la cual indica la velocidad con la que una partícula de material desciende por la columna de agua. Figura 1.1.

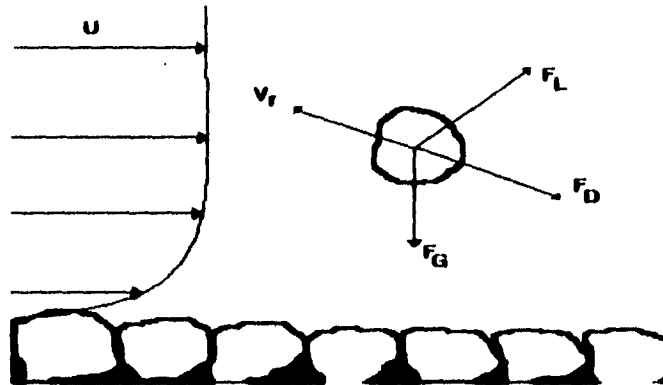


Figura 1.1 Fuerzas que actúan en una partícula de sedimento en suspensión.

La ecuación de movimiento para una partícula en suspensión que se deriva de la segunda ley de Newton, está dada por:

$$m\ddot{x} - F_L - \left(\frac{y}{v_r}\right) - F_D\left(\frac{u-x}{v_r}\right) = 0 \quad (1.4)$$

$$m\ddot{y} - F_L\left(\frac{u-x}{v_r}\right) + F_D\left(\frac{y}{v_r}\right) + F_G = 0$$

donde las fuerzas de arrastre, sustentación y gravitación provocan la aceleración de la partícula. Esta ecuación está dada en coordenadas cartesianas sobre el plano vertical.

1.1.2 Características del sedimento.

1) **Tamaño.** Se determina en forma directa, ya sea por tamización o por sedimentación y análisis microscópico, según sea el tamaño.

2) **Forme.** Es un parámetro de gran importancia, pues de él depende la facilidad de transporte de la partícula. Para caracterizarlo, se usa el "factor de forma": $sf = c/(ab)^{0.5}$, donde a, b y c son medidas en tres ejes perpendiculares entre sí, *ie* a el eje mayor y c el menor.

3) **Densidad.** Puesto que la mayoría de los sedimentos provienen de la desintegración de las rocas cuya densidad varía de 2500-2700 kg/m³ (un valor estándar es 2650 kg/m³)

4) **Velocidad de sedimentación (w_s),** es la velocidad obtenida a partir de la ecuación de equilibrio entre fuerzas de gravedad y arrastre, anteriormente mencionada podemos reescribir la ecuación 1.3:

$$\frac{\pi}{6}(\rho_s - \rho_l)g = C_D \frac{1}{2} w_s^2 \frac{\pi}{4} d^2 \quad (1.5)$$

5) **Ángulo de reposo.** Representa la pendiente máxima en la que puede estar una partícula en equilibrio. Depende de la forma y tamaño de la misma.

1.1.3 Sedimento-Flujo.

Otros parámetros importantes que no sólo se refiere al del sedimento sino también a las características del fluido y del flujo son:

1) **Parámetro de la partícula.** Indica la influencia de la gravedad, densidad y viscosidad:

$$D_* = \left[\frac{(s-1)}{\nu^2} \right]^{1/3} d_{50} \quad (1.6)$$

2) **Parámetro de movilidad de la partícula, también llamado parámetro de Shields,** indica la razón de las fuerzas hidrodinámicas y gravitacionales.

$$\Theta = \frac{(u_*')^2}{(s-1)g d_{50}} \quad (1.7)$$

3) **Esfuerzo cortante sobrante.** Representa el excedente sobre el esfuerzo cortante crítico para iniciar el movimiento de la partícula.

$$T = \frac{\tau_b - \tau_{b,cr}}{\tau_{b,cr}} \quad (1.8)$$

4) **Densidad en función de la porosidad.** Es la masa efectiva del sólido por unidad de volumen.

$$\rho_{scc} = (1-p)\rho_s \quad (1.9)$$

5) **Parámetro de suspensión, llamado el parámetro de Rouse,** representa los efectos de difusión/dispersión sobre las partículas en suspensión.

$$Z = \frac{w_s}{\beta \kappa u_*'} \quad (1.10)$$

6) **Coefficiente que determina el efecto de la concentración de partículas sobre la velocidad de sedimentación, que inhibe la velocidad de caída de una partícula.**

$$v_{sm} = (1-c)^x v_s \quad (1.11)$$

$$\chi = \chi(Re)$$

7)Viscosidad en función de la concentración.

$$\frac{v}{v_{rf}} = 1 + k_c C \quad (1.12)$$

8)Rugosidad del fondo. Nikuradse ideó el concepto de rugosidad equivalente de la arena (k_s). Sin embargo, para fondos móviles, además de la rugosidad del material (rugosidad de cada partícula), también se toma en cuenta la rugosidad propia de la forma del fondo (rugosidad en función de las características del fondo). van Rijn proporciona varios criterios para obtener estas dos rugosidades[14].

9)Concentración. La concentración se considera en forma volumétrica, c_v (volumen sed./volumen liq.) o en forma másica, c_m (masa de sed./volumen liq.).

Raudkivi obtiene una relación entre ambas[13]:

$$C_v = \frac{c_m/s}{(1-c_m) + c_m/s} \quad (1.13)$$

1.1.4 Transporte de sedimentos.

Se llama transporte de sedimentos al acarreo de partículas sólidas como consecuencia de las fuerzas hidráulicas que actúan sobre ellas.

El transporte de sedimentos, se puede dar de dos formas:

- Transporte de sedimento por suspensión.
- Transporte de sedimento por arrastre de fondo.

y es causado por corrientes.

1.1.4.1 Inicio del movimiento.

El movimiento de una partícula en reposo sobre el piso, se origina cuando el esfuerzo cortante en el fondo es superior a un esfuerzo cortante crítico a partir del cual se inicia el transporte de los sólidos, un parámetro útil para observar este fenómeno es la velocidad de cortante (u_*), que está en función del esfuerzo cortante en el fondo (τ_b).

Una forma general de saber si una partícula que se encuentra en reposo en el fondo va iniciar su movimiento, es comparar el parámetro de Shields (ecuación 1.7) arriba definido respecto a su valor crítico. Si el estado de esfuerzos sobre el fondo no rebasa este valor crítico, no habrá movimiento de las partículas de sedimento. Este parámetro crítico de Shields es función de las condiciones cerca del fondo, de la forma de la partícula y de la posición de éstas con respecto a las otras. Este

parámetro delimita el inicio del movimiento, cuando el Shields es mayor a este valor crítico, y el estado en reposo. Figura 1.2.

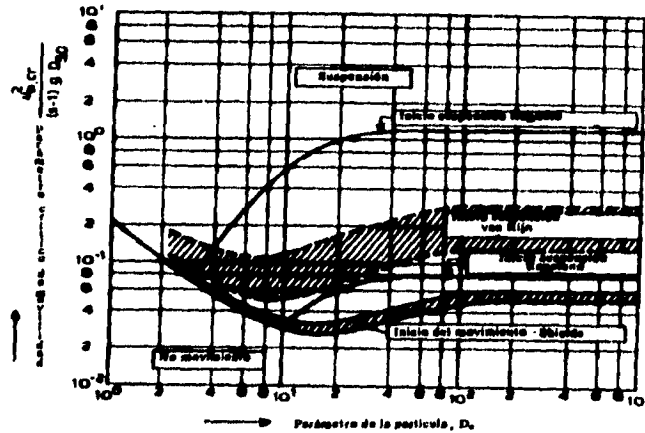


Figura 1.2 Inicio del movimiento y de la suspensión [14].

Una forma de obtener θ_{cr} en función del parámetro D_* , está dado por [14]:

$$\begin{aligned}
 \theta_{cr} &= 0.24 D_*^{-1} & 1 < D_* \leq 4 \\
 \theta_{cr} &= 0.14 D_*^{-0.64} & 4 < D_* \leq 10 \\
 \theta_{cr} &= 0.04 D_*^{-0.1} & 10 < D_* \leq 20 \\
 \theta_{cr} &= 0.013 D_*^{-0.29} & 20 < D_* \leq 150 \\
 \theta_{cr} &= 0.055 & D_* > 150
 \end{aligned}
 \tag{1.14}$$

El transporte por suspensión se inicia cuando las fuerzas hidrodinámicas arrastran las partículas del fondo ingresando a la corriente turbulenta.

Habrá suspensión cuando la velocidad de cortante (u_*) aumenta tal que es mayor o igual a la velocidad de sedimentación. Si las fluctuaciones turbulentas de los vórtices tienen una componente vertical que exceda la magnitud de la velocidad de sedimentación de la partícula, ésta se mantendrá en suspensión.

Bagnold [14] supone que la suspensión de una partícula inicia cuando:

$$\tilde{w} = [\overline{w'^2}]^{0.5} \geq w_s
 \tag{1.15}$$

donde w_s es la componente vertical de la velocidad turbulenta. Otros criterios más recientes proponen que la suspensión se inicia cuando:

$$\begin{aligned}
 1 < D_* \leq 10; \quad \frac{u_{*crs}}{w_s} = \frac{4}{D_*} \\
 D_* > 10; \quad \frac{u_{*crs}}{w_s} = 0.4
 \end{aligned}
 \tag{1.16}$$

1.1.4.2 Transporte de sedimento por arrastre de fondo.

El transporte por arrastre de fondo es un movimiento de las partículas por efectos netamente gravitatorios y de arrastre hidrodinámico, por lo que el transporte se produce por deslizamiento, rodamiento y en algunos casos por pequeños saltos longitudinales. En la capa del fondo se considera que la energía turbulenta es muy pequeña, por lo que su influencia es despreciable, esto trae consigo que la suspensión de la partícula no sea viable.

La cuantificación del transporte de fondo se ha expresado por varias ecuaciones semiempíricas, entre las que se encuentran:

Meyer-Peter y Müller (1948):

$$q_{b,c} = 8[(s-1)g]^{0.5} d_{50}^{1.5} (\mu\theta - 0.047)^{1.5} \tag{1.17}$$

Frijlink (1952):

$$q_{b,c} = 5 \mu^{0.5} u_{*c} d_{50} e^{-0.27/(10^{\mu})} \tag{1.18}$$

Bagnold (1966):

$$q_{b,c} = \frac{e_b}{(\rho_s - \rho)g(\tan\phi - \tan\beta)} \tau_b u \tag{1.19}$$

Experimentos más recientes de van Rijn [14] comprobaron que la forma de transporte que predomina es la que implica pequeños saltos de las partículas, por lo que conocer la altura de salto, d_b , es de gran importancia, ya que el transporte de fondo se define como:

$$q_{b,c} = u_b \delta_b c_b \tag{1.20}$$

Los parámetros anteriores, se cuantifican de la siguiente manera:

Según van Rijn [14] la velocidad u_b , está dada por:

$$u_b = 1.57^{0.6} [(s-1)gd]^{0.5} \tag{1.21}$$

obtiene la altura de salto como:

$$\frac{\delta_b}{d} = 0.3 D_*^{0.7} T^{0.5} \quad (1.22)$$

y la concentración del transporte por arrastre como:

$$\frac{c_b}{c_o} = 0.18 \frac{T}{D_*} \quad (1.23)$$

donde c_o es la máxima concentración del transporte por arrastre de fondo y tiene un valor de 0.65 [26]. Otra ecuación para encontrar dicha concentración esta dada por Zyzerman y Fredsoe [17]

$$c_b = \frac{0.331(\theta - 0.045)^{1.75}}{1 + \frac{0.331}{0.46}(\theta - 0.045)^{1.75}} \quad (1.24)$$

Una vez generalizado el movimiento de las partículas del fondo, se empiezan a formar surcos paralelos, que se generalizan en todo el fondo y finalmente se forman las dunas. Esta configuración se crea por perturbaciones en la capa límite laminar, siempre y cuando, el fondo sea suficientemente móvil (ciertos valores de D^* y R^*).

1.1.4.3 Transporte por suspensión.

El transporte del sedimento en suspensión en la columna de agua está dado por la integral siguiente:

$$q_{s,c} = \int_0^h uC dz \quad (1.25)$$

Sin embargo, ello implica que se deben conocer los perfiles de velocidad, concentración, además de una concentración de referencia en una distancia del fondo determinada.

Los análisis tradicionales, se basan en estudiar el gradiente de concentraciones vertical con base en la ecuación de transporte de masa definida por la ecuación siguiente:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (C(v + w_s) - D_m \nabla C) = 0 \quad (1.26)$$

si el fluido es incompresible:

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (1.27)$$

quedando:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v \nabla C + \nabla \cdot (C w_s) - D_m \nabla^2 C = 0 \quad (1.28)$$

Considerando que el comportamiento turbulento se puede describir a través de fluctuaciones alrededor de un valor medio *ref.* capítulo 2

$$\begin{aligned} V &= \bar{v} + v' \\ C &= \bar{c} + c' \end{aligned} \quad (1.29)$$

Por lo que la ecuación de transporte de masa se convierte en:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v \nabla C = D_m \nabla^2 c - \nabla \cdot (c' v') - \nabla \cdot (c w_s) \quad (1.30)$$

El término de transporte por fluctuaciones turbulentas se puede definir en términos de los coeficientes de difusión turbulenta, $e_{m,t}$.

$$\nabla \cdot (C' v') = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_{m,x} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{m,y} \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{m,z} \frac{\partial c}{\partial z} \right) \right] \quad (1.31)$$

Si se consideran dos dimensiones, que la distribución de la concentración en dirección horizontal es homogénea y la difusión molecular es despreciable. La ecuación de difusión queda en término del eje y vertical-ascendente de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} D_{m,y} \frac{\partial c}{\partial y} + \frac{d}{dy} c w_s &= 0 \\ D_{m,y} \frac{\partial c}{\partial y} + c w_s &= 0 \end{aligned} \quad (1.32)$$

Para estimar un valor de $D_{m,y}$, es admisible considerarlo proporcional a la difusión turbulenta de la cantidad de movimiento del fluido ν_t , se obtienen la siguiente expresión:

$$D_{m,y} = \sigma \phi \nu_t \quad (1.33)$$

El factor σ es el número de Schmith, algunas veces llamado número de Prandtl, y relaciona la difusión del fluido y la difusión del escalar. El factor ϕ considera el efecto de la concentración de partículas dentro de la estructura turbulenta del fluido.

Ahora suponiendo una distribución de velocidades logarítmica

$$u = \frac{u_* c}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1.34)$$

e integrando la ecuación 1.32 se obtiene la siguiente distribución de concentraciones, la cual es llamada "Perfil de Rouse" [14]:

$$\frac{c}{c_a} = \left(\frac{d-z}{z} \frac{a}{d-a} \right)^z \tag{1.35}$$

$$Z = \frac{w}{\beta \kappa u_*}$$

Para diferentes perfiles de la viscosidad turbulenta, en la ecuación 1.32:

$v_t = \frac{1}{\alpha_t} \kappa u_* h$	Constante	
$v_t = \frac{1}{\alpha_t} \kappa u_* h \frac{y}{h}$	Lineal	
$v_t = \kappa u_* h \frac{y}{h} \left(1 - \frac{y}{h}\right)$	Parabólico	(1.36)
	Parabólico-lineal	
$v_t = \kappa u_* h \frac{y}{h} \left(1 - \frac{y}{h}\right)$	para $y/h < 0.5$	
$v_t = 0.25 \kappa u_* h$	para $y/h \geq 0.5$	

se obtienen los respectivos perfiles de concentración que pueden ser de los siguientes tipos:

$\frac{c}{c_a} = e^{-\alpha_t (Z/h)(y-a)}$	Constante	
$\frac{c}{c_a} = \left(\frac{a}{y}\right)^{\alpha_t z}$	Lineal	
$\frac{c}{c_a} = \left(\frac{h-y}{y} \frac{a}{h-a}\right)^z$	Parabólico	(1.37)
	Parabólico-lineal	
$\frac{c}{c_a} = \left(\frac{h-y}{y} \frac{a}{h-a}\right)^z$	para $y/h < 0.5$	
$\frac{c}{c_a} = \left(\frac{a}{h-a}\right)^z e^{-\alpha_t (y/h-0.5)}$	para $y/h \geq 0.5$	

donde $c = f(y)$ y $c = c_a$ para $y = a$

La constante κ en el número de Rouse Z de la ecuación 1.35, es la llamada constante de von Kármán y tiene un valor aproximado de 0.4. Sin embargo, este valor puede variar para concentraciones altas [15].

Los métodos más comunes para obtener la tasa de transporte en suspensión, al igual que el transporte de fondo, son semiempíricos, y a continuación se describen en función de cada autor.

-Einstein (1950).-Se basa en una distribución parabólica del coeficiente de mezclado del fluido y una distribución logarítmica de la velocidad.

$$q_{s,c} = 11.6 u_*' c_a a [I_2 + I_1 \ln(30.2eh / d_{63})]$$

$$I_1 = 0.216 \frac{A^{2-1}}{(1-A)^2} \int_A^1 \left(\frac{1-z'}{z'}\right)^2 dz' \quad (1.38)$$

$$I_2 = 0.216 \frac{A^{2-1}}{(1-A)^2} \int_A^1 \left(\frac{1-z'}{z'}\right)^2 \ln(z') dz'$$

-Begnold (1966).-Utiliza un balance de energía y relacionando la carga suspendida con el trabajo hecho por el fluido.

$$q_{s,c} = \frac{e_s(l e_h)}{(\rho_s - \rho)g(w_s / u - \tan \beta)} \tau_h u \quad (1.39)$$

-Bijker (1971).-Con base en el concepto de Einstein, propone:

$$q_{s,c} = 1.83 q_{h,c} [I_2 + I_1 \ln(33h / k_s)] \quad (1.40)$$

$$q_{h,c} = hu_*' d_{50} e^{-0.2z'/(10\theta)}$$

-van Rijn (1984).-Basándose en una distribución parabólica-constante de concentración, logarítmica de velocidad y una corrección para concentraciones altas obtiene:

$$q_{s,c} = \frac{u_*' c_a}{\kappa} \left(\frac{a}{h-a}\right)^2 \left[\int_{0.5h}^h \left(\frac{h-z}{z}\right)^2 \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + \int_{0.5h}^h e^{-12(z/h-0.5)} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) dz \right] \quad (1.41)$$

El transporte total de sedimentos está dado por:

$$q_t = q_b + q_s \quad (1.42)$$

1.1.4.4 Nivel de referencia "a".

El nivel de referencia "a" es una altura con respecto al piso donde inicia el transporte por suspensión de partículas [14]. Conociendo la concentración en este nivel de referencia se puede conocer el perfil de concentraciones, por esta razón su importancia en el estudio tradicional de transporte de sedimento por suspensión.

No existe una forma para conocer dicha altura, ésta es tomada un tanto al azar, sólo considerando que deba ser mayor al 1% del tirante [14].

La concentración a este nivel de referencia se calcula en el presente trabajo de acuerdo con la formulación propuesta por van Rijn [14]:

$$c_a = 0.015 \frac{d_{50} T^{1.5}}{a D^{0.3}} \quad (1.43)$$

1.1.5 Transporte de sedimento en equilibrio y no equilibrio.

Se ha planteado una teoría de transporte de sedimento en equilibrio, i.e. transporte neto nulo entre planos horizontales. Sin embargo, cuando no se ha alcanzado dicho equilibrio, existe un transporte de sedimento a través de planos horizontales, al cual se le llama estado de no equilibrio. Figura 1.3.

Se sabe que la distribución de sedimentos suspendidos en dos dimensiones y en estado permanente está dado por la ecuación siguiente:

$$U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} (-v'c' + w_s C) \quad (1.44)$$

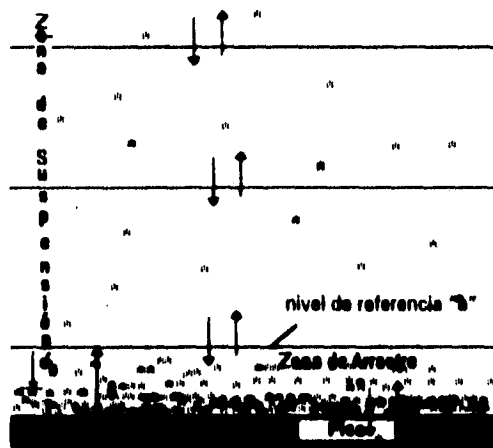


Figure 1.3 Transporte en no equilibrio
Transporte entre planos horizontales.

La parte izquierda de la ecuación 1.44 corresponde al transporte advectivo de sedimentos, mientras que la parte derecha representa el flujo neto a través de cualquier plano horizontal. Si el perfil de concentraciones no varía en la dirección del eje horizontal, quiere decir que la parte derecha de la ecuación es igual a cero, por lo que el flujo neto a través de cualquier plano horizontal será igual a cero, ya que dicho flujo es cero en la superficie.

El flujo debido a la gravedad (deposición) y el debido a la turbulencia (suspensión) están en equilibrio, esto es:

$$\overline{v'c'} = w_s C \quad (1.45)$$

El equilibrio no significa que no haya deposición o resuspensión de las partículas, si no que el flujo neto en cada plano horizontal es igual a cero.

Como consecuencia del punto anterior, se llega a que el transporte de sedimento suspendido es constante:

$$q_s = \int_{b_s}^h UC_T dy = cte \quad (1.46)$$

Para la situación anterior, el transporte de sedimento por suspensión es máximo (es llamado capacidad de transporte de la corriente) y se dice que está bajo condiciones de saturación o equilibrio.

Existen dos situaciones de no-equilibrio:

1) Cuando q_s es mayor que la capacidad de transporte. La deposición de sedimento existe hasta que q_s alcanza la capacidad de transporte.

2) Cuando q_s es menor que la capacidad de transporte. Hay sedimento disponible del fondo que se pone en suspensión hasta que se alcanza la capacidad de transporte.

Como es de suponer, para el caso de no equilibrio el flujo neto de sedimento es diferente de cero, esto es:

$$\frac{\partial}{\partial y} (-\overline{vc'} + w_s C) \neq 0 \quad (1.47)$$

En la altura de referencia "a" la condición de frontera es:

$$\frac{D_m}{\sigma_c} \frac{\partial C}{\partial y} + w_s C = D - E = \frac{dq_s}{dx} \quad (1.48)$$

la cual indica la diferencia entre deposición de sedimento D y suspensión del mismo E. La deposición está dada por $w_s C_s$ [1], pero para el conocimiento de la cantidad de material que empieza a suspender E no existen parámetros exactos que permitan conocerla.

Jobson y Sayre[1] modelaron esta diferencia como:

$$D - E = Aw_s C_s \quad (1.49)$$

donde A es la probabilidad de que una partícula toque el fondo y se deposite ahí. $A = 0$ si $C_s < C_{smax}$ y $A = 1 - C_{smax}/C_s$ si $C_s > C_{smax}$.

van Rijn propone que el valor E es:

$$E = [D_{im} \frac{\partial C}{\partial y}]_{y=0} \quad (1.50)$$

Otros autores obtienen ecuaciones semiempíricas "pick-up functions" como [25]:

Einstein:

$$E = \alpha \rho_s (\Delta g D)^{0.5} P \quad (1.51)$$

Yalin:

$$E = \alpha \rho_s u_* P \quad (1.52)$$

Nagakawa-Tsujimoto:

$$E = \alpha \rho_s (\Delta g D)^{0.5} [1 - \frac{0.035}{\theta}]^3 \theta \quad (1.53)$$

Fernandez Luque:

$$E = \alpha \rho_s (\Delta g D)^{0.5} (\theta - \theta_{cr})^{1.5} \quad (1.54)$$

α para estas dos últimas ecuaciones es igual a 0.02. El uso de estas ecuaciones tiene el problema de que van Rijn [13] no especifica las unidades de D y α .

Cabe mencionar que existe un intercambio de sedimento, entre la parte en suspensión y arrastre (antes mostrada) y entre la parte de arrastre y piso

1.2. Objetivo de esta tesis

Desarrollar un modelo numérico para estudiar el transporte de sedimentos, el cual se implantará en el código numérico PHOENICS, el cual servirá para resolver las ecuaciones de transporte de las variables utilizadas. Las rutinas del modelo aquí propuesto se implantan con relativa facilidad en el código numérico, y el modelo numérico así desarrollado permite mayor versatilidad para resolver oportunamente problemas generales de transporte de sedimento.

Se pretende que este modelo simule el transporte por arrastre de fondo, por suspensión y las interacciones entre estos dos, así como, estudiar el transporte por suspensión en equilibrio y no equilibrio.

Para validar el modelo, se requerirán de mediciones experimentales y expresiones matemáticas semiempíricas, las cuales se tomarán de la literatura, pues no se tiene contemplado el trabajo en el laboratorio.

A partir de este modelo, estudiarán fenómenos aplicados a problemas reales, como el estudio de desarenadores, sedimentadores, transporte de sedimento marino en playas, lagunas y escolleras, entre otros.

1.3. Teoría

El estudio del transporte de sedimentos que se desarrolla en el presente trabajo, se basa en los siguientes modelos matemáticos:

1.3.1 Ecuaciones Fundamentales de la Mecánica de Fluidos.

1.3.1.1 Ecuación de Conservación de la Cantidad de Movimiento.

Esta ecuación llamada también segunda ley de Newton, se expresa de la siguiente manera:

$$\Sigma F = \frac{d(mv)}{dt} \quad (1.55)$$

donde el producto mv es llamado cantidad de movimiento. En coordenadas Eulerianas por unidad de volumen se puede escribir:

$$\rho \frac{D\bar{v}}{Dt} = \int_{\text{cuerpo}} + \int_{\text{superficie}} \quad (1.56)$$

donde la derivada de la ecuación anterior, es llamada derivada material, y es igual a una parte temporal (I), cambio de la variable con respecto al tiempo y a un término advectivo(II), cambio de la variable con respecto a la posición.

$$\frac{D\bar{v}}{Dt} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + (\bar{v} \cdot \nabla) \bar{v} \quad (1.57)$$

(I) (II)

Finalmente la ecuación de conservación de cantidad de movimiento, queda:

$$\rho \frac{D\bar{v}}{Dt} = \rho g - \nabla P + \mu \nabla^2 \bar{v} + S_s \quad (1.58)$$

Esta ecuación vectorial, está formada de los siguientes términos (de izquierda a derecha): Fuerza de cuerpo (peso), gradiente de presión, términos difusivos, fuentes de cantidad de movimiento.

Esta ecuación puede modelar cualquier tipo de flujo. Sin embargo, en el caso de flujos turbulentos (altos números de Reynolds) se desarrollan una gran cantidad de vórtices de diferentes escalas. Las más grandes dependen de la geometría de las fronteras, y las más pequeñas son impuestas por la

viscosidad del fluido. Según la teoría de "cascada energética" de Kolmogorov los vórtices grandes pierden parte de su energía cinética por diversos mecanismos de inestabilidad, para producir vórtices de menor talla. Este proceso seguirá sin pérdida de energía, hasta que el tamaño del vórtice sea tan pequeño, que las fuerzas viscosas se impongan a las inerciales disipando la energía cinética de los vórtices.

Para que la ecuación de Navier-Stokes, pueda ser resuelta numéricamente, se necesitaría una malla con celdas de un tamaño no mayor a:

$$l_k = \left(\frac{v^3}{\varepsilon}\right)^{1/3} \quad (1.59)$$

llamada escala de Kolmogorov, para lo cual no existe computadora capaz de poder procesar tal cantidad de datos. Para darse cuenta de dicho tamaño, cabe decir que la escala en la cual se disipa la energía por viscosidad en la capa límite atmosférica (varios kilómetros) es del orden de milímetros (6).

Reynolds [16] usando el concepto de tiempo promedio, supuso a las variables como la suma de un valor promedio más una fluctuación.

$$\begin{aligned} u &= \bar{u} + u' \\ v &= \bar{v} + v' \\ w &= \bar{w} + w' \\ P &= \bar{P} + P' \\ C &= \bar{C} + C' \end{aligned} \quad (1.60)$$

Introduciendo las expresiones anteriores en las ecuaciones de Navier-Stokes, conservación de masa y conservación de un escalar y aplicando las reglas de promedio siguientes:

$$\begin{aligned} \overline{f'} &= 0 \\ \overline{\overline{f}} &= \overline{f} \\ \overline{f'g'} &= \overline{f'g} \\ \overline{f'g} &= 0 \\ \overline{f+g} &= \overline{f} + \overline{g} \\ \frac{\partial \overline{f}}{\partial x} &= \frac{\partial \overline{f}}{\partial x} \\ \overline{fg} &= \overline{f} \overline{g} + \overline{f'g'} \\ \int \overline{f} ds &= \int \overline{f} ds \end{aligned} \quad (1.61)$$

encontró un término más en la ecuación de cantidad de movimiento y en la del escalar, quedando intacta la de conservación de masa.

Estos términos son los siguientes: en la ecuación de cantidad de movimiento, se le llamó esfuerzo de Reynolds.

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{(u_j u_i)} \quad (1.62)$$

y en la ecuación de conservación de un escalar se le llama difusión turbulenta .

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{(u_j C)} \quad (1.63)$$

1.3.1.2 Conservación de masa.

Indica la conservación de la cantidad de masa, relacionando la derivada material de la variable con la dilatación normal total de una partícula de volumen unitario:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \operatorname{div} V = 0 \quad (1.64)$$

1.3.1.3 Modelo de turbulencia.

El modelo utilizado, es el modelo k-ε, el cual es un modelo de dos ecuaciones: k energía cinética turbulenta y ε disipación de energía turbulenta.

Se basa en el modelo tradicional de Boussinesq (1877)[16], el cual hace análogo el esfuerzo de Reynolds al esfuerzo molecular:

$$-\overline{\rho u' v'} = \mu_t \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \quad (1.65)$$

donde m_t es la viscosidad turbulenta, la cual no es propiedad del fluido, si no de las condiciones de flujo.

Las dos nuevas variables se obtienen resolviendo sus respectivas ecuaciones de transporte:

$$\begin{aligned} \frac{Dk}{Dt} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_i}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + v_i \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \varepsilon \\ \frac{D\varepsilon}{Dt} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_i}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 v_i \frac{\varepsilon}{k} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (1.66)$$

donde s_k y s_ε son "números de Prandtl" que relacionan la difusión viscosa con la difusión de k y ε respectivamente. C_1 y C_2 son constantes empíricas que según Spalding y Leander [16] son igual a: $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $s_k = 1.0$, $s_\varepsilon = 1.3$. Estos valores no son universales y pueden cambiar para ciertos problemas (e.g. chorros y esteles).

La viscosidad turbulenta está dada por:

$$v_t = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (1.67)$$

$$C_\mu = 0.09$$

Cerca de las paredes, se considere que la velocidad varíe de acuerdo con la ley de pared, y sólo a una distancia y_p de la ley de pared, a partir de este punto el modelo tiene validez, ya que este modelo de turbulencia no funciona para números de Reynolds pequeños. En este punto la energía turbulenta, la disipación de la energía turbulenta y la velocidad tienen un valor dado por:

$$\begin{aligned} \frac{u_p}{u_*} &= \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{u_* y_p}{\nu} \right) + B \\ k_p &= \frac{u_*^2}{C_v^{0.5}} \\ \varepsilon_p &= \frac{u_*^3}{\kappa y_p} \end{aligned} \quad (1.68)$$

1.3.1.4 Ecuación de transporte de un escalar (concentración de sedimentos).

Esta ecuación convectiva difusiva, está dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + (v - w_s) \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_m \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_m \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_m \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (1.69)$$

donde el lado de la derecha es el término difusivo, el cual depende de un parámetro de difusividad, llamado difusividad másica y se relaciona con la difusividad de cantidad de movimiento (viscosidad) a partir de la definición del número de Schmidt (muchas veces llamado también número Prandtl):

$$Sc = \frac{\nu}{D_m} \quad (1.70)$$

El lado izquierdo de la ecuación se compone de los términos temporal el advectivo con una modificación en el eje vertical por efecto de la velocidad de caída del sedimento.

1.3.2 Ecuaciones semiempíricas.

1.3.2.1 Obtención de la concentración C_b .

En el apartado 1.1.4.2 se define el transporte por arrastre de fondo como: $q_b = u_b \delta_b c_b$, la concentración c_b , servirá para conocer dicho transporte. Dos métodos obtenidos de resultados experimentales, son los siguientes:

Van Rijn [14]:

$$c_b = 0.018 c_o \frac{T}{D_s} \quad (1.71)$$

donde c_o es la máxima concentración que puede haber ($c_o = 0.65$), obtenida por van Rijn en estudios experimentales [14].

Zyserman y Fredsoe [17]:

$$c_b = \frac{0.331(\theta - 0.045)^{1.75}}{1 + \frac{0.331}{0.46}(\theta - 0.045)^{1.75}} \quad (1.72)$$

1.3.2.2 Viscosidad en función de la concentración.

El modelo de Einstein, el cual es obtenido de las ecuaciones fundamentales de la hidrodinámica [8], dice que la viscosidad del fluido cambia de la siguiente forma con respecto a la concentración de sedimentos que transporta el fluido:

$$\frac{\mu}{\mu_{ref}} = 1 + k_\mu C \quad (1.73)$$

K_m es un valor alrededor de 2.5. Según Oliver y Ward [3] $k_\mu = 2.45$ para un rango de concentración de 0-30% (volumétrico).

Para concentraciones altas, Bagnol [14] propone una ecuación válida para concentraciones volumétricas de 0.1-0.6%:

$$v = v_{ref} (1 + \lambda)(1 + 0.5\lambda)$$

$$\lambda = ((0.74 / c)^{1/3} - 1)^{-1} \quad (1.74)$$

1.3.2.3 Variación de la densidad en función de la concentración de sedimentos.

En el caso en que se use la variación de densidad, y como la concentración de sedimentos está dada en fracción volumétrica, y suponiendo que la densidad de los sedimentos es igual a 2650 kg/m³, se tiene que:

$$\rho_{mezcla} = (1 - C)\rho_{agua} + C\rho_{sed.} \quad (1.75)$$

1.3.3 Velocidad de cortante.

Esta variable, llamada velocidad sólo por sus unidades, está dada por:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (1.76)$$

es un parámetro de gran utilidad para el estudio de la fricción.

1.3.4 Esfuerzo crítico de Shields.

Indica el inicio del movimiento de una partícula dada y está dado por:

$$\tau_{h,cr} = (\rho_s - \rho) d_{50} \theta_{cr} \quad (1.77)$$

θ_{cr} generalmente está en función de D_* .

1.4 Fundamentos del código numérico PHOENICS

La simulación se realizó implantando las ecuaciones de transporte en el código numérico PHOENICS, cuyo principio de operación se basa en el método de volumen finito para discretizar el dominio computacional y convertir las ecuaciones de transporte en ecuaciones algebraicas que se resuelven en forma iterativa.

En el código numérico se han implantado las rutinas que permiten la solución de la ecuación generalizada de transporte:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla(\rho v\phi) - \nabla(\Gamma\phi\nabla\phi) = S_\phi \quad (1.78)$$

ϕ es cualquier variable dependiente, V es el vector velocidad, ρ densidad, Γ coeficiente de transporte de la variable dependiente, y S_ϕ representa al término fuente por unidad de volumen.

	ϕ	Γ_ϕ
CONTINUIDAD.	1	0
CANTIDAD DE MOVIMIENTO.	u,v,w	μ
ENERGIA CINETICA TURBULENTA	k	$(\mu_t + \mu_r)/\sigma_k$
RAPIDEZ DE DISIPACION	ϵ	$(\mu_t + \mu_r)/\sigma_\epsilon$

TABLA 1.1 Variables con sus coeficientes de difusión.

Introduciendo en la ecuación 1.78 las variables (ϕ) con sus términos difusivos se obtienen las respectivas ecuaciones de transporte.

El método del volumen finito que utiliza PHOENICS, se basa en los siguientes puntos:

División del dominio físico de interés en un número finito tal que exista sólo un volumen alrededor de cada punto de la malla computacional. Cada celda, es topológicamente cartesiana, teniendo seis lados existiendo un punto en el centro o en las caras de la celda en cada celda (nodo), donde el valor de las variables son representativos de toda la celda.

Las ecuaciones diferenciales se integran para cada volumen de control (celda) de tamaño finito, pudiendo conocer con esto el comportamiento de las variables en el dominio completo.

Se integra con base en una interpolación (lineal, armónica, etc), la cual puede variar para cada variable con el fin de encontrar los valores de las variables en las caras de las celdas y sirvan para evaluar la integral.

Cabe hacer mención que el método de volumen finito no utiliza series de Taylor alrededor de un punto para discretizar el dominio, como lo hace las diferencias finitas, lo que implica que no habrá errores de truncamiento, ya que la integración de las ecuaciones de conservación da balances exactos.

La integración deja n ecuaciones de volumen finito, las cuales son algebraicas y tienen la forma:

$$a_P \phi_P = a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_{II} \phi_{II} + a_I \phi_I + b \quad (1.79)$$

Cuando estas ecuaciones son lineales, se pueden resolver con métodos tradicionales como el método de eliminación de Gauss o el de Thomas para una matriz tridiagonal. Sin embargo cuando se trata de ecuaciones no lineales, para resolverlas se requiere de métodos iterativos (SIMPLE y SIMPLER).

Un ejemplo sencillo que permite demostrar como se realiza la integración sobre un volumen finito es el fenómeno de conducción de calor unidimensional que se basa en la siguiente ecuación:

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) + S = 0 \quad (1.80)$$

Integrando y evaluando en las caras e y w del volumen de control, figura 1.4, se obtiene la ecuación:

$$\left(k \frac{dT}{dx} \right)_e - \left(k \frac{dT}{dx} \right)_w + \int_c^w S dx = 0 \quad (1.81)$$

Considerando una fórmula de interpolación lineal, la ecuación se discretiza:

$$\frac{k_e (T_E - T_P)}{(\delta_x)_e} - \frac{k_w (T_P - T_W)}{(\delta_x)_w} + \bar{S} \Delta x = 0 \quad (1.82)$$

y finalmente se obtiene una ecuación para este volumen finito que será resuelta para obtener los valores de las variables en cada celda.

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + b$$

$$a_E = \frac{k_e}{(\delta_x)_e}$$

$$a_W = \frac{k_w}{(\delta_x)_w} \quad (1.83)$$

$$a_P = a_E + a_W$$

$$b = \bar{S} \Delta x$$

S es la cantidad de calor generado por unidad de volumen y b representa una fuente de la ecuación de volumen finito.

Con este método se pretende, que si la integral de las ecuaciones de conservación se satisface para un grupo de volúmenes finitos, entonces satisficará a todo el dominio. Mientras más sean los puntos, la solución exhibirá un mejor balance, esto es, se llegará a una solución más exacta.

Cuando el fenómeno es más complejo, se tendrán que resolver más ecuaciones de transporte, para esto se utiliza el método Simple o Simpler [10].

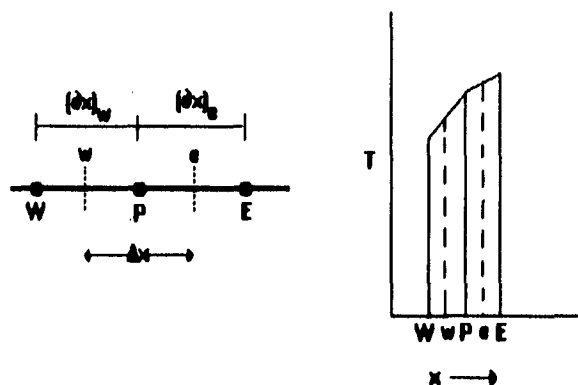


Figura 1.4 (a) Malla de un método de volumen finito, P es el nodo de la celda y las líneas punteadas sus caras, (b) Interpolación de los valores de las variables.

El código numérico PHOENICS utiliza el método Simplest, que es un método modificado del Simpler, para resolver iterativamente las ecuaciones de transporte. Este método consta de tres niveles de iteración, como se muestra en la figura 1.5, los cuales son:

1. Resuelve las ecuaciones lineales en un plano xy, basándose en el método de la matriz tridimensional.
2. Resuelve la hidrodinámica, método SIMPLEST o IPSA.
3. Resuelve todas las variables para un slab (celdas en cada plano xy). Cuando el método a resuelto el las variables en todo el dominio se dice que se ha realizado una "Barrida" (sweep).

La forma en que PHOENICS monitorea la convergencia es a partir de los residuales, definidos como la diferencia entre el valor de la variable en la celda antes de la barrida, y el nuevo valor calculado.

$$\zeta_p = a_p \phi_p - \sum_{F=W,E,N,S,H,L} a_F \phi_F + a_r \phi_r + b \tag{1.84}$$

Cuando la suma de los residuales en el slab (caso parabólico) o en todo el dominio (caso elíptico) es menor a un valor predeterminado de monitoreo, se dice que el modelo a convergido.

Una forma de promover la convergencia es la relajación, la cual no permite que los valores nuevos varien en forma importante de los preexistentes, tomando en cuenta que una relajación excesiva, puede llegar a soluciones ficticias. Se pueden implantar dos tipos de relajación, que son la lineal y la de "intervalo de tiempo ficticio":

$$\phi_{nuevo} = \phi_{viejo} + \alpha (\phi^* - \phi_{viejo})$$

(1.85)

$$\frac{\rho \nabla_p}{\Delta t_f} (\phi_p - \phi_{p,viejo})$$

donde α es un factor de relajación ($0 < \alpha \leq 1$) y Δt_f se le llama falso paso de tiempo.

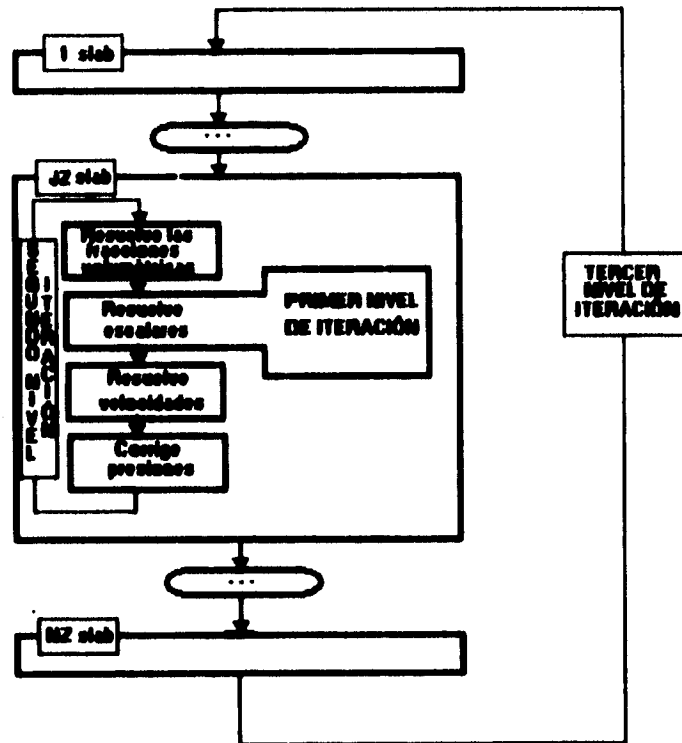


Figura 1.5 Niveles de iteración del código numérico PHOENICS

2. MODELO

2.1 Introducción

Para un estudio formal del proceso de transporte de sedimentos, sería necesario crear un modelo euleriano-lagrangiano, la parte euleriana que modele el comportamiento del fluido y la lagrangiana que modele el movimiento de cada partícula de sedimento. Sin embargo, esto resultaría por demás complicado y su resolución numérica sería imposible por la cantidad de ecuaciones que se necesitarían resolver para considerar varios cientos de miles o millones de partículas.

Una forma secundaria sería considerar, ya no al sedimento como partículas discretas, sino como un medio continuo. Para resolver este problema se necesita un modelo numérico bifásico, el cual no tiene los problemas del modelo anterior. Sin embargo, existen dos problemas principales: el primero es el tiempo máquina que sería grande, pero el más importante es que la convergencia de los métodos numéricos bifásicos resulta difícil, porque se requieren definir las relaciones de intercambio entre las fases, las cuales son generalmente no lineales.

Aunque los problemas que acarrea un modelo bifásico no resultan insalvables, se decidió que se podrían aprovechar las ventajas de un modelo de tercera generación como es el código numérico PHOENICS para estudiar el fenómeno. Entre las ventajas se tiene:

- Creación y resolución de cualquier tipo de modelo, siempre y cuando se especifiquen correctamente todos los parámetros del problema en el protocolo del código que se puede considerar como "una fábrica para construir modelos".
- Reducción de costos y tiempos en el desarrollo.
- Métodos numéricos más poderosos para resolución de los problemas.
- Robustez y flexibilidad.
- Facilidad de implementar nuevas rutinas para mejorar y aumentar el área de aplicación del modelo.
- Fácil despliegue, importación, exportación e interpretación de resultados.

2.2 Transporte de sedimentos por suspensión y acumulación de partículas en el fondo.

El transporte por suspensión se modela a partir de una ecuación de transporte escalar (concentración), ecuación 2.1. Dicho escalar, que representa la concentración del sedimento, no afecta la hidrodinámica del flujo y sólo es un marcador que es transportado por éste.

$$\frac{\partial C'}{\partial t} + u \frac{\partial C'}{\partial x} + v \frac{\partial C'}{\partial y} + w \frac{\partial C'}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_m \frac{\partial C'}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_m \frac{\partial C'}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_m \frac{\partial C'}{\partial z} \right) \quad (2.1)$$

A esta ecuación difusiva-advectiva se le añade un término fuente producto de la advección creada por la velocidad de sedimentación de las partículas, esto es, dicha fuente modela el efecto gravitatorio sobre el sedimento:

$$w_s \frac{\partial C}{\partial y} \tag{2.2}$$

La ecuación resultante de la suma de las ecuaciones 2.1 y 2.2, es la expresión matemática que se utiliza para modelar el transporte de sedimento por suspensión, para cada fracción de los sedimentos representada por su velocidad de caída característica (i.e. se utiliza una ecuación para cada fracción).

El término fuente anterior tiene en general un signo negativo debido a la derivada parcial (concentraciones menores a alturas mayores). El efecto numérico de esta fuente es que quita sedimento (concentración) del dominio computacional para crear con esto un perfil en equilibrio. Figura 2.1. Este sedimento desechado en la realidad cae a través de la columna de agua al piso del canal.

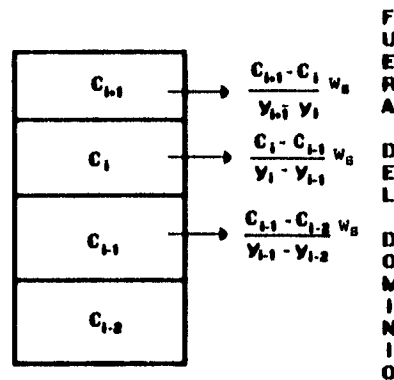


Figura 2.1 Modelo numérico con el sumidero de la ecuación 2.2

Para evitar la pérdida de sedimento se desarrolló una modificación, a la que se llamaría "segundo modelo", que utiliza igualmente el sumidero dado por la ecuación 2.2, pero además procura representar una conservación de masa del sedimento. Para esto, se introduce una fuente adicional a la ecuación de transporte que regresa el sedimento que pierde cada celda a la inmediata inferior.

Para explicar el método, supóngase una malla cartesiana. Figura 2.2. El flujo de sedimento que pierde la celda c_{i+1} ($c_i > c_{i+1}$) se calcula a partir de la ecuación 2.3 representada en diferencias finitas hacia atrás como:

$$w_s \frac{C_{i+1} - C_i}{y_{i+1} - y_i} \tag{2.3}$$

Sin embargo, esta pérdida de sedimento para la celda de arriba ($i+1$), ingresará en la celda (i), ecuación 2.4, como lo muestra la figura 2.2.

$$-w_s \frac{C_{i+1} - C_i}{y_{i+1} - y_i} \tag{2.4}$$

Esta celda cuya concentración es c_i también tendrá una pérdida ($c_{i+1} > c_i$), dada por:

$$w_s \frac{C_i - C_{i-1}}{y_i - y_{i-1}} \tag{2.5}$$

por lo que el transporte gravitacional neto de la celda (i), será la suma de las ecuaciones 2.4 y 2.5.

$$\text{Flujo neto} = -w_s \frac{C_{i+1} - C_i}{y_{i+1} - y_i} + w_s \frac{C_i - C_{i-1}}{y_i - y_{i-1}} \tag{2.6}$$

Durante el desarrollo del modelo se observó que no era posible la utilización de un sumidero y una fuente de sedimento simultáneas para una sola concentración, ya que entonces el método numérico tiende a la divergencia.

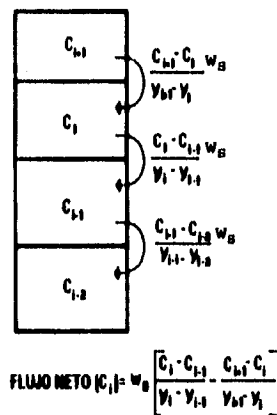


Figura 2.2 Modelo alterno.

Por este motivo se resuelven dos ecuaciones para cada fracción de sedimento identificadas por su concentración, ambas idénticas, tanto en concentraciones como en características de sedimento y condiciones de frontera. En la primera ecuación, identificada con C1, (sumidero), se calcula el flujo de sedimento que pierde la celda, sólo se le añade el término de la ecuación 2.2; y en la segunda, identificar con C2, (fuente) se introduce el flujo neto antes descrito con las ecuaciones 2.4 y 2.5.

Adicionalmente, se considera una tercera ecuación, idéntica a las anteriores, a la cual no se le aumenta ninguna fuente o sumidero, identificada con C3. Esta ecuación representa el transporte difusivo-advectivo de la concentración.

El modelo consta de los siguientes pasos:

a) Se resuelven las ecuaciones de C_i , $i=1,2,3$ arriba descritas.

b) La cantidad de material retirado en cada celda debida al sumidero gravitacional es la suma algebraica de $C_1 - C_3 = C_4$ ($C_4 < 0$).

c) Por conservación de masa del sedimento, C_4 es la cantidad que se le debe añadir a C_2 . Para obtener la concentración final como $C_5 = C_2 + C_4$. Este paso se hace como una forma de corrección del perfil de concentraciones, ya que sin ella los valores de la concentración cerca del piso resultan elevados.

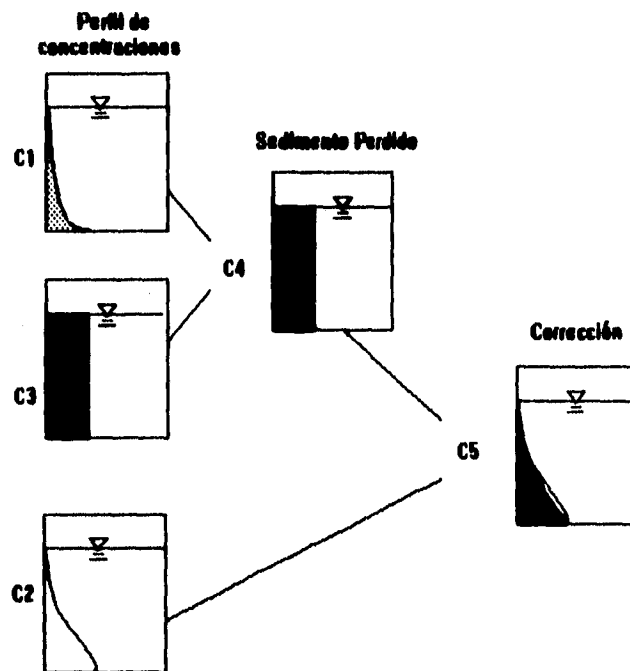


Figura 2.3 Explicación del modelo alterno.

En este momento se cuenta con dos modelos de transporte de sedimentos, que se aplican, como se vera más tarde, a diferentes casos.

El modelo permite calcular el depósito de sedimento, esto es el sedimento que no queda en suspensión eventualmente llega el fondo, y se podrá cuantificar celda por celda hasta la adyacente al piso cuya concentración al final del intervalo de tiempo especificado se calcula como:

$$C_{f,i,x} = \sum_i^{ny} (C_{eliminada,i,x}) + C_{i,i,x} \quad (2.7)$$

El valor final (f) de la concentración de la primera celda será la suma de lo eliminado en las celdas superiores mas el valor inicial (i) de concentración de dicha celda. Con esto se obtiene un esquema conservativo de la concentración.

2.3 Resuspensión de partículas.

El intercambio de sedimento entre la zona de arrastre y la de suspensión sucede cuando la turbulencia genera un esfuerzo cortante lo suficientemente grande para "arrancar" una partícula del suelo donde las fuerzas viscosas y gravitatorias son las predominantes. Este transporte entre planos horizontales, se ha calculado de manera práctica a partir de ecuaciones semiempíricas llamadas funciones de arrastre "*pick-up functions*" que obtienen el gasto del sedimento que se transporta.

En el presente trabajo se especifica que la resuspensión del sedimento se produce en función del cortante creado por una diferencia de velocidades entre el flujo y el piso y por el tamaño del sedimento.

Este fenómeno depende del modelo de transporte de sedimento en suspensión anteriormente visto, el cual considera un perfil de concentración en equilibrio. Será en función de este comportamiento de equilibrio que las partículas se resuspendan o se mantengan en el piso. En la figura 2.4 se observa que todo transporte de sedimento en suspensión tiende al equilibrio, el flujo tiene una capacidad de transportar cierta cantidad de sedimento (q_c). Si hay déficit, tratará de obtener sedimento del piso (resuspensión) para llegar al equilibrio, si al contrario transporta mayor cantidad de sedimento del que puede, eliminará sedimento de la zona de suspensión acumulándolo en el piso.

El modelo sigue el comportamiento que muestra la figura 2.4. Cuando la energía turbulenta es lo suficientemente grande para resuspender partículas (potencial que desequilibra el transporte por suspensión de sedimento, ya que se inicia un transporte entre planos horizontales), tratará de hacerlo hasta que se llegue nuevamente a un perfil de concentraciones en equilibrio para el flujo dado.

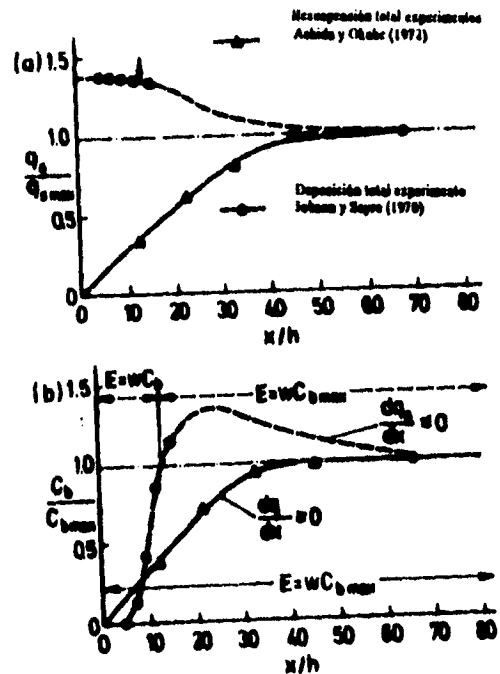


Figura 2.4 Datos experimentales han mostrado que el perfil de concentraciones tienden al equilibrio [14].

2.4 Transporte por arrastre de fondo.

Se considera que el transporte de fondo se modela con la ecuación:

$$q_b = u_b \delta_b c_b \tag{2.8}$$

Los parámetros anteriores se obtienen de ecuaciones empíricas obtenidas por van Rijn [14], en función principalmente del cortante en el piso y del tamaño del sedimento. Dichos parámetros fueron definidos en el capítulo anterior.

Según van Rijn existirá una altura d_b a partir del suelo, dentro de la cual se produce el transporte de fondo, ya sea por saltos, rodamiento u otros mecanismos de transporte. Dicho sedimento se transporta con velocidad u_b y por lo tanto el gasto volumétrico por unidad de ancho se define por la ecuación 2.8.

El presente modelo numérico se basa en este razonamiento. Primero se calcula el gasto de sedimento transportado, no considerando resuspensión y deposición en cada celda del fondo a partir de la expresión 2.8 y luego se obtiene la ganancia de concentración de sedimento de cada celda en un tiempo determinado, con base en la siguiente ecuación:

$$Concentración_{[m^3_{sedimento}/m^3_{agua}]} = \frac{Gasto_{sed}_{[m^3_{sedimento}/s]} \Delta t_{[s]}}{Volumen_{celda}_{[m^3_{agua}]}} \quad (2.9)$$

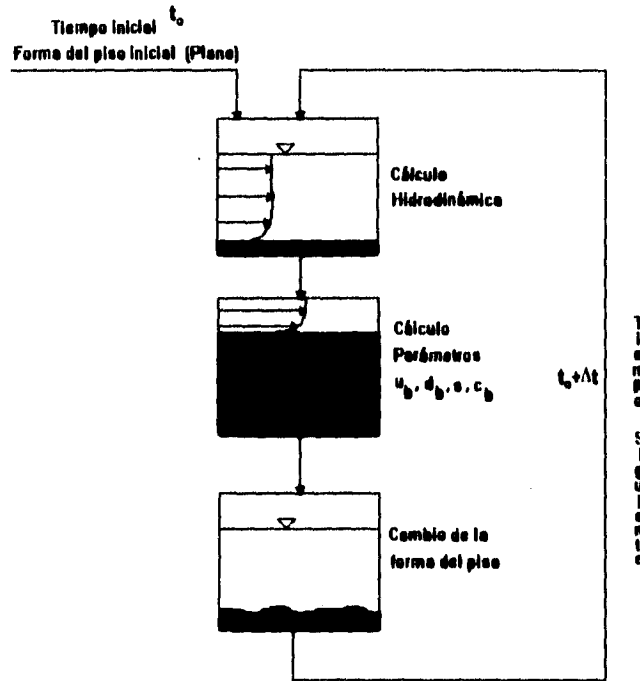


Figura 2.5 Modelo de transporte de sedimento por arrastre de fondo.

Si esta concentración es positiva, quiere decir que hubo una ganancia y se debe sumar a la que ya había en un tiempo anterior. Si es negativa, hubo erosión y dicha cantidad se restará a la concentración en el tiempo anterior.

Este modelo calcula el transporte de sedimento por arrastre en un tiempo determinado teniendo una forma de suelo prescrito. Al final del intervalo de tiempo cambia esta forma de acuerdo con el transporte de sedimento calculado. La nueva forma del piso, que modifica ligeramente la hidrodinámica, se utilizará en el siguiente intervalo de tiempo.

Existe una concentración volumétrica máxima, que depende de la porosidad del sedimento depositado en el fondo. Una celda no puede tener una concentración mayor que ésta. La porosidad puede variar de un 40% en arena de cuarzo, 45% en arena fina [14].

El modelo comienza con una cama inicial de sedimentos, con una concentración máxima inicial, la cual puede variar según sean las condiciones hidrodinámicas.

Si el cambio en concentración es positivo y la concentración de la celda en el tiempo anterior era la concentración máxima, entonces no se podrá incrementar más, por lo que no se le sumará a esta celda el incremento, si no a la celda inmediata superior. Si ahora el cambio en concentración es negativo y el decremento fuera mayor que la concentración de la celda, ésta no podrá tener valor negativo. El decremento se le restará a la concentración de esta celda hasta que su valor llegue a cero y el resto, a la celda inmediata inferior. Se realizó una subrutina para evitar concentraciones mayores a la concentración máxima, así como concentraciones negativas.

Cuando la concentración en la celda llega a una concentración mayor a c_b , esta se bloquea cancelando las velocidades del flujo, pues una concentración mayor a c_b significa que esta celda ya forma parte del sedimento depositado que no tiene movilidad.

Como se puede notar el piso cambia de forma, por lo que se hizo necesario programar una subrutina que fuera calculando el esfuerzo cortante en el piso aunque la forma del piso cambiara en el tiempo, para que el perfil de velocidades del flujo fuera lo más cercano a la realidad.

Para esto es necesario introducir un término más a la ecuación de cantidad de movimiento producto de la fricción y fijar valores de k e en las celdas más próximas al piso. Esto se hizo bajo el siguiente razonamiento:

A partir de la ley logarítmica para una pared lisa:

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + A \quad (2.10)$$

considerando las variables A y E que se definen como:

$$\begin{aligned} A &= \ln(e^{xA} / \kappa) \\ E &= e^{xA} \end{aligned} \quad (2.11)$$

entonces la ley logarítmica para pared lisa queda,

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) \quad (2.12)$$

La ley logarítmica para una pared rugosa, está dada por:

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y/k) + B \quad (2.13)$$

De manera similar al caso de la pared lisa, sean:

$$\begin{aligned} B &= \frac{1}{\kappa} \ln(e^{xB}) \\ E &= e^{xB} / k^+ \end{aligned} \quad (2.14)$$

y se tiene entonces la misma expresión 2.12 para la pared rugosa. Es claro que E estará es función de la rugosidad del piso.

Esta ecuación sirve para encontrar el coeficiente local de fricción "s" definido como:

$$s = \frac{\tau}{\rho |V|^2} \quad (2.15)$$

$|V|$ es la velocidad resultante paralela a la pared. Como el esfuerzo cortante de fricción esta dado por:

$$\tau = \rho U_*^2 \quad (2.16)$$

s será igual a:

$$s = 1/(U_*^+)^2 \quad (2.17)$$

Substituyendo esta expresión en la ecuación logarítmica de pared 2.12, y desarrollando se obtiene que:

$$s = \left[\frac{\kappa}{\ln(E Re s^{0.5})} \right]^2 \quad (2.18)$$

ecuación que permite determinar el coeficiente de fricción local de forma iterativa.

El valor de E va a depender, como ya se dijo, de la rugosidad del piso [18], y se puede considerar las siguientes rangos según el tipo de flujo:

LISO ($0 \leq Re^+ \leq 3.7$):

$$E = Em = e^{k^+} \quad (2.19)$$

TRANSICIÓN ($3.7 \leq Re^+ \leq 100$):

$$E = [\alpha (k^+ / \beta)^2 + (1 - \alpha) / Em^2]^{1/2} \quad (2.20)$$

$$\alpha = (1 + 2 X_c^3 - 3 X_c^2)$$

$$X_c = 0.02248(100 - k^+)(k^+)^{-0.564}$$

$$\beta = 29.7$$

RUGOSO ($Re^+ > 100$):

$$E = \frac{\beta}{k^+} \quad (2.21)$$

Con este coeficiente se obtiene el término fuente de la ecuación de cantidad de movimiento para cada velocidad paralela a la pared en las celdas inmediatas al piso. Este término es la fuerza que produce el esfuerzo cortante sobre el piso y esta dado por:

$$S_{\phi} = \tau A = s A \rho |\bar{V}| \bar{v} \quad (2.22)$$

\bar{v} (u y v) es la velocidad en cada dirección paralela al piso.

Según Launder y Spalding [5], para las celdas inmediatas a una pared, el valor de k y ϵ se debe fijar con los valores siguientes:

$$k_p = \frac{s |\bar{V}|^2}{0.09^{0.5}} \quad (2.23)$$

$$\epsilon_p = \frac{k^{1.5} (0.1643 / \kappa)}{L}$$

A partir de esta subrutina, se puede conocer los esfuerzos en suelos cambiantes, lo que se puede considerar como un desarrollo general al código PHOENICS y se aprovecha en el presente trabajo para el cálculo del transporte de fondo en cada celda del piso para cada intervalo de tiempo.

2.5 Condiciones iniciales y de frontera.

2.5.1 Condiciones de frontera.

2.5.1.1 Ecuación de Cantidad de movimiento.

Las condiciones de frontera para la ecuación de cantidad de movimiento, son las que se observan en la Figura 2.6.

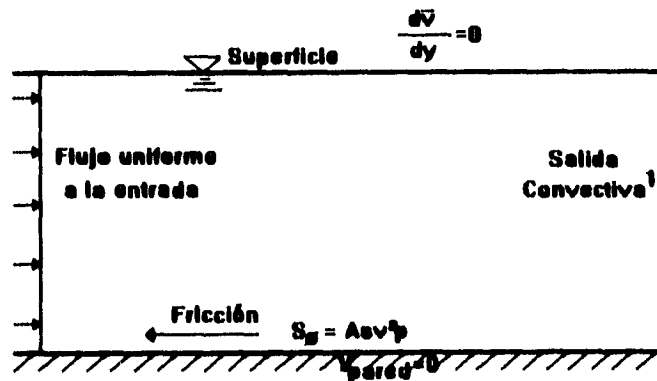


Figura 2.6 Condiciones de frontera ecuación de cantidad de movimiento.¹

¹ La condición de frontera de salida, "convectiva", significa que sólo el flujo por convección afecta a la variable en esta frontera, esto es, el transporte difusivo es cero.

2.5.1.2 Conservación de masa.

Las condiciones de frontera son las mostradas en la figura 2.7.

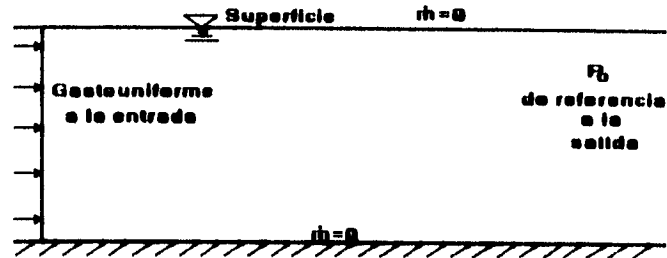


Figura 2.7 Condiciones de frontera para la ecuación de conservación de masa.

2.5.1.3 Modelo de la turbulencia.

2.5.1.3.1 Energía cinética turbulenta (k)

Las condiciones de frontera son las mostradas en la figura 2.8

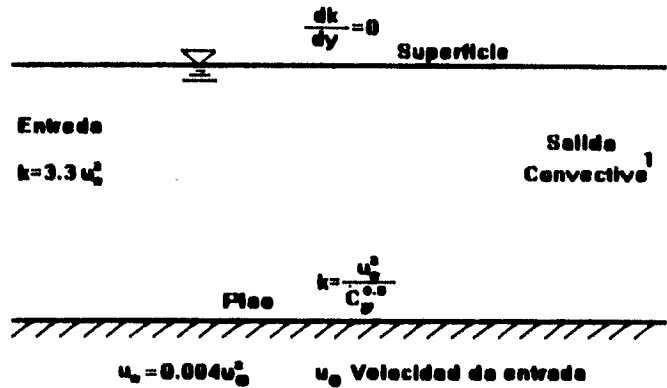


Figura 2.8 Condiciones de frontera para la ecuación de la energía cinética turbulenta

2.5.1.3.2 Rapidez de disipación turbulenta

Las condiciones de frontera son las mostradas en la figura 2.9

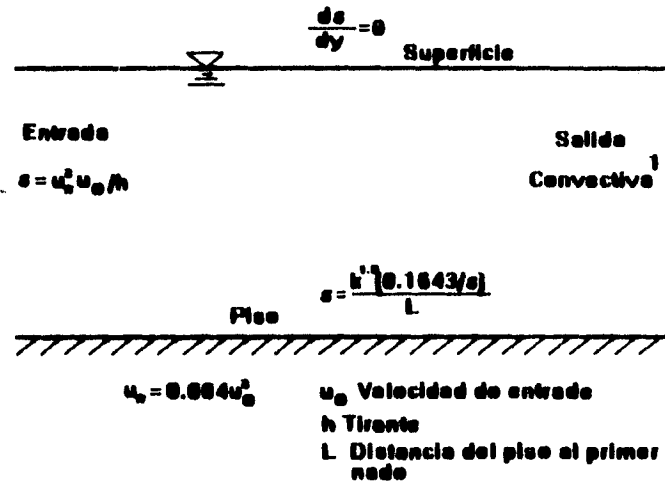


Figura 2.9 Condiciones de frontera para la ecuación de la disipación de energía cinética turbulenta.

2.5.1.4 Concentraciones del sedimento.

Las condiciones de frontera son las mostradas en la figura 2.10.

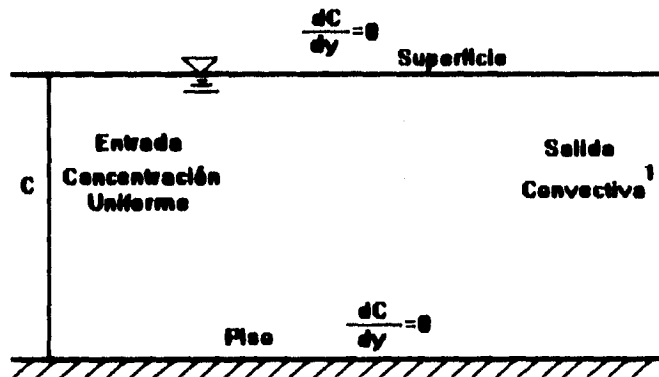


Figura 2.10 Condiciones de frontera para la ecuación de transporte de un escalar (concentración).

2.5.2 Condiciones iniciales.

No se requieren condiciones iniciales específicas. Se pueden añadir algunas, como perfil de concentraciones, perfil de velocidades, concentración inicial en ciertas celdas (en el piso por ejemplo), entre otras. Sin embargo, su implementación es opcional.

3. RESULTADOS

El modelo numérico se calibró comparando los resultados obtenidos con el código numérico PHOENICS con datos experimentales medidos, expresiones analíticas y en algunos casos sólo con una comparación cualitativa de comportamientos reportados del fenómeno en estudio.

3.1 Comprobación del transporte por suspensión.

El fenómeno de transporte de sedimento en suspensión se calibró, gracias a la abundancia de literatura y a la ayuda documental del SINTEF¹ de Noruega. Primeramente en un canal no prismático tridimensional y posteriormente en un sedimentador bidimensional.

3.1.1 Canal tridimensional.

El canal donde se realizaron la pruebas[9] se presente en vista de planta y elevación en la figura 3.1, y las concentraciones fueron medidas en los puntos que se muestran en la figura 3.2.

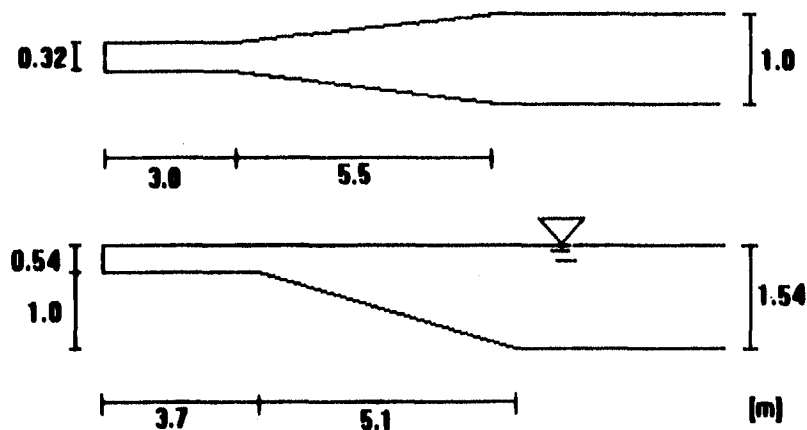


Figure 3.1 Dimensiones del canal tridimensional

Las mediciones experimentales, fueron realizadas en el SINTEF, y parte de ellas publicadas por Olsen *et al.*[9] y el complemento fueron proporcionadas por ellos mismos. Los datos del sedimento están dados en la tabla 3.1

¹ "The Norwegian Hydrotechnical Laboratory" en Noruega.

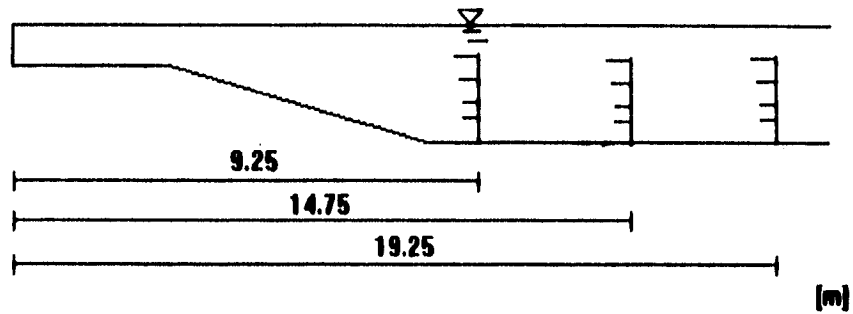


Figura 3.2 Puntos de medición de concentración de sedimento.

Tamaño	Diámetro (mm)	Vel. sedim. (cm/s)	Gasto (kg/s)
1	0.45	7.0	0.0625
2	0.30	4.0	0.0625
3	0.20	2.5	0.0625
4	0.10	0.8	0.0625

TABLA 3.1 Características del sedimento en el canal tridimensional.

Los resultados numéricos se obtuvieron una malla de 11x21x60 volúmenes de control o celdas que discretización el canal antes mencionado, figura 3.3. El número de Prandtl turbulento de la disipación de la energía cinética turbulenta se consideró de $\sigma_t=0.9^2$, este valor que es el recomendado por Olson *et al.* [9]. El perfil de velocidades al final del canal, con $\sigma_t=1.3$, era fuertemente afectado por la turbulencia, siendo diferente el comportamiento numérico con el experimental medido.

Las gráficas 3.1 y 3.2 comparan los datos experimentales con los numéricos de los perfiles de concentraciones y velocidad en varias secciones a lo largo del canal. Se observa la excelente

² El Prandtl turbulento estandar es de $s=1.3$

correlación, ya que prácticamente todos los datos están sobre la línea de pendiente de 45°.

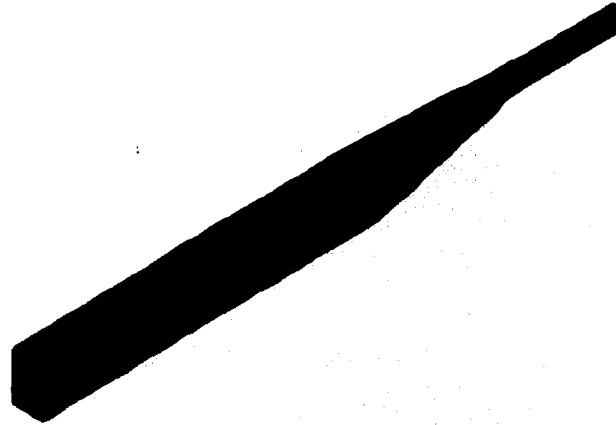
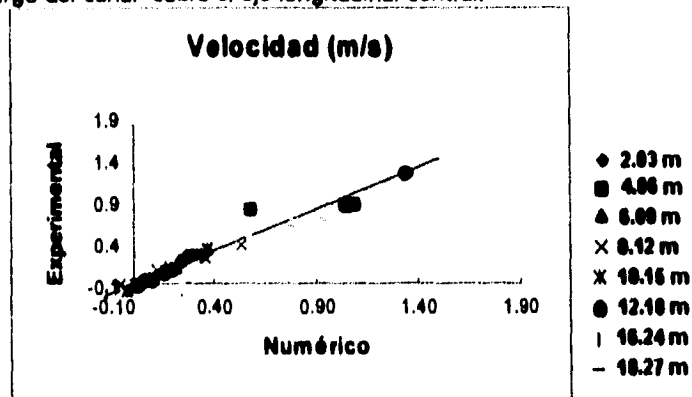
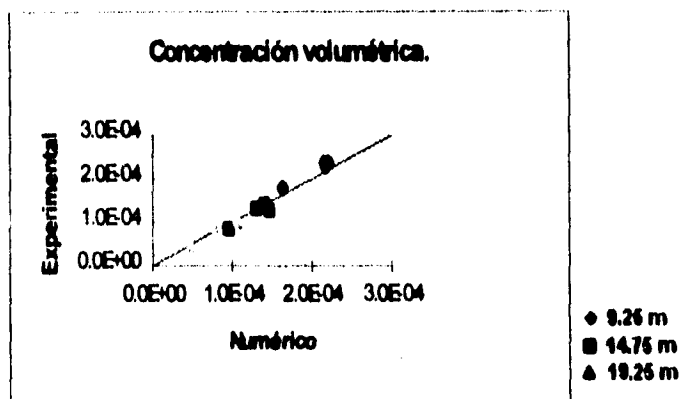


Figura 3.3 Malla (11x21x60) del canal tridimensional.

En la gráfica 3.3, se comparan los datos experimentales con los numéricos calculados, para 6 secciones a lo largo del canal sobre el eje longitudinal central.

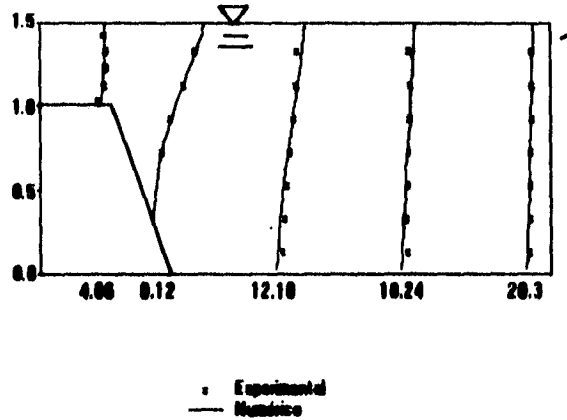


Gráfica 3.1 Comparación de los datos experimentales para la velocidad.

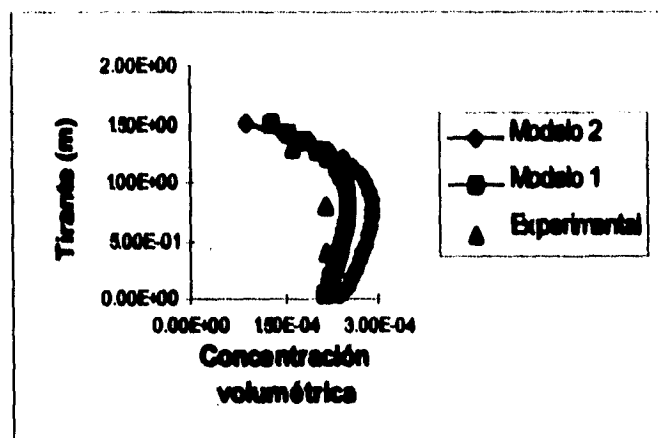


Gráfica 3.2 Comparación de los datos experimentales para la concentración.

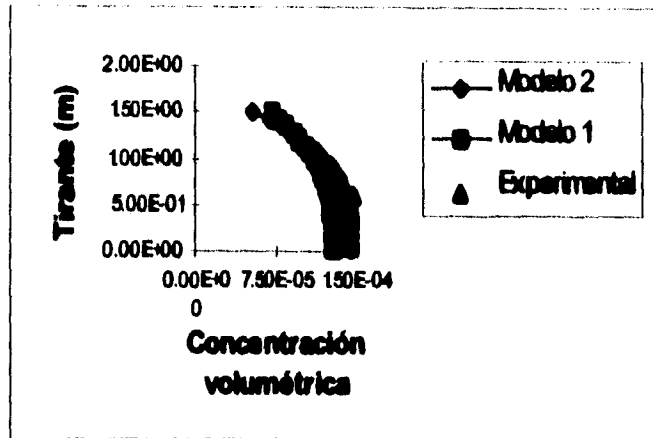
En las gráficas 3.4, 3.5 y 3.6, se comparan los datos experimentales con los dos modelos propuestos en el capítulo 2, observándose que el segundo modelo predice mejor el perfil de datos, salvo en la primera sección.



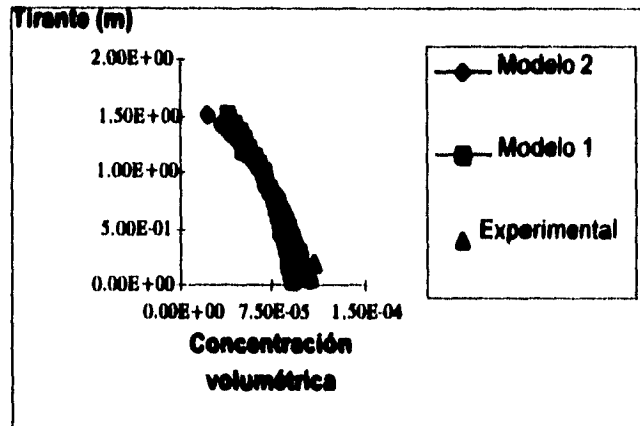
Gráfica 3.3 Comparación de los perfiles de velocidad numéricos y experimentales



Gráfica 3.4 Comparación de los resultados numéricos y los resultados experimentales a 9.25m



Gráfica 3.5 Comparación de los resultados numéricos y los resultados experimentales a 14.75m



Gráfica 3.6 Comparación de los resultados numéricos y los resultados experimentales a 19.25m

En la gráfica 3.7, se observa una región con alta difusión de sedimentos ($2D_m$), debido a la turbulencia. En esta sección donde se realizó la primera medición del perfil de sedimentos (gráfica 3.4), el transporte gravitacional del sedimento es desplazado por el turbulento que resuspende las partículas, es por esta razón que el segundo modelo no predice eficientemente el comportamiento en esta zona, ya que es un modelo netamente gravitacional. Sin embargo, conforme la intensidad de turbulencia va disminuyendo, la eficiencia del modelo mejora notablemente.

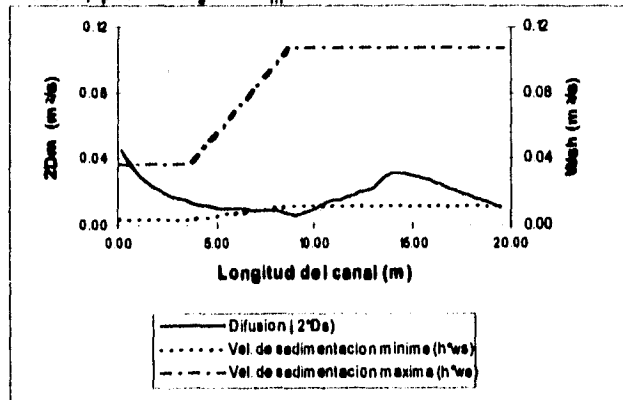
Una forma de explicar lo anterior es a partir de la expresión que propone Hoys *et al.* [4], la cual relaciona los efectos turbulentos con los gravitatorios sobre el sedimento en suspensión:

$$w^* = \frac{w_s}{u^*} \tag{3.1}$$

o por:

$$w' = \frac{w_s h}{2 D_m} \tag{3.2}$$

Cuando $w' < 0.1$, predomina el transporte turbulento de sedimento, habiendo una mayor difusión de éstos y por lo tanto, los efectos gravitatorios no son importantes. Aunque en este caso esta relación no es inferior a 0.1, pero si $w_s h < 2 D_m$.



Gráfica 3.7 Comportamiento de los dos parámetros de la ecuación de Hoyal para el canal tridimensional.

En la gráfica 3.7 se grafican los cocientes de la expresión de Hoyal para el canal en estudio $w_s h$ (efecto gravitacional) para la fracción máxima y mínima de tamaño de sedimento en el canal y el doble del coeficiente de difusión del sedimento ($2D_m$) el cual se obtiene como:

$$D_m = \frac{v_t}{\sigma_t} + \frac{v_l}{\sigma_l} \tag{3.3}$$

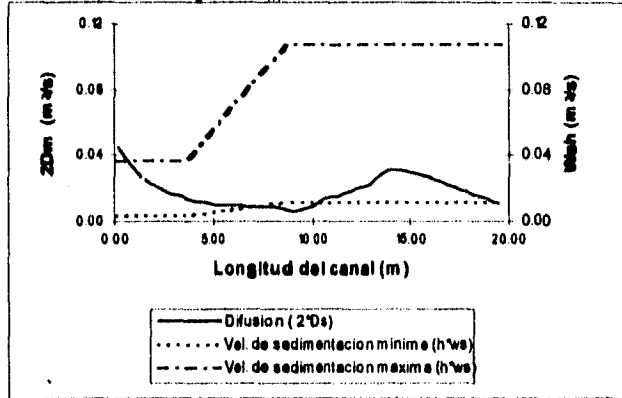
donde los valores del número de Schmith, tanto turbulento como laminar son igual a de 0.8 [7]

3.1.2 Sedimentador bidimensional

La segunda calibración del modelo se realizó para una simulación numérica bidimensional para lo cual se modeló el tanque sedimentador de Sarnia, Canada, ampliamente estudiado. Este tanque tiene las dimensiones descritas en la figura 3.4 y ha sido una base comparativa del modelado bidimensional. Se discretizó el dominio con una malla de 60x30, figura 3.5,

$$w^* = \frac{w_s h}{2 D_m} \tag{3.2}$$

Cuando $w^* < 0.1$, predomina el transporte turbulento de sedimento, habiendo una mayor difusión de éstos y por lo tanto, los efectos gravitatorios no son importantes. Aunque en este caso esta relación no es inferior a 0.1, pero si $w_s h < 2 D_m$.



Gráfica 3.7 Comportamiento de los dos parámetros de la ecuación de Hoyal para el canal tridimensional.

En la gráfica 3.7 se grafican los cocientes de la expresión de Hoyal para el canal en estudio $w_s h$ (afecto gravitacional) para la fracción máxima y mínima de tamaño de sedimento en el canal y el doble del coeficiente de difusión del sedimento ($2D_m$) el cual se obtiene como:

$$D_m = \frac{v_l}{\sigma_l} + \frac{v_l}{\sigma_l} \tag{3.3}$$

donde los valores del número de Schmith, tanto turbulento como laminar son igual a de 0.8 [7]

3.1.2 Sedimentador bidimensional

La segunda calibración del modelo se realizó para una simulación numérica bidimensional para lo cual se modeló el tanque sedimentador de Sarnia, Canada, ampliamente estudiado. Este tanque tiene las dimensiones descritas en la figura 3.4 y ha sido una base comparativa del modelado bidimensional. Se discretizó el dominio con una malla de 60x30, figura 3.5,

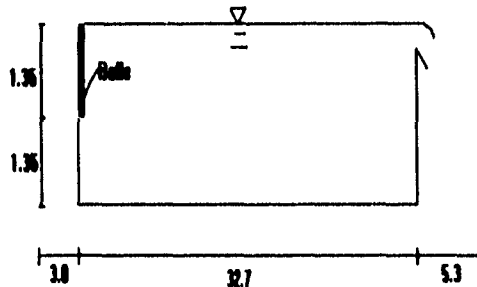


Figure 3.4 Dimensiones del canal bidimensional.

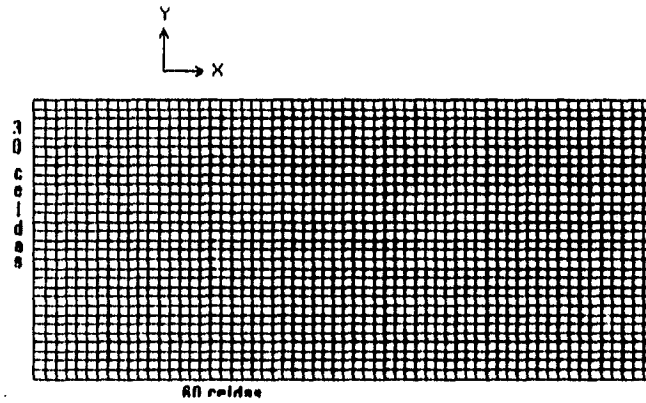


Figura 3.5 Malla (60x30) canal bidimensional.

Los datos del sedimento están dados en la tabla 3.2 [11].

En las gráficas 3.8 y 3.9 se presentan los perfiles de concentración y velocidad en cinco distancias longitudinales. En el caso de la concentración el modelo sobreestima en un 20% los valores experimentales en general. En cuanto al perfil de velocidad, el modelo predice una uniformidad sobre el tirante, con deformación en la entrada, en la esquina derecha y cerca del piso, mientras que los datos experimentales presentan un máximo en $y/h \approx 0.3$ por razones que a continuación se explican. Cabe mencionar que Rodi y Stamou[11] también calcularon un perfil cuasil uniforme con su modelo numérico.

Tamaño	Vel.Sedim. (mm/s)	Fracción (%)
1	2.25	40.0
2	1.5	15.0
3	1.1	15.0
4	0.9	5.0
5	0.56	5.0
6	0.0	25.0

Tabla 3.2 Características del sedimento sedimentador bidimensional.

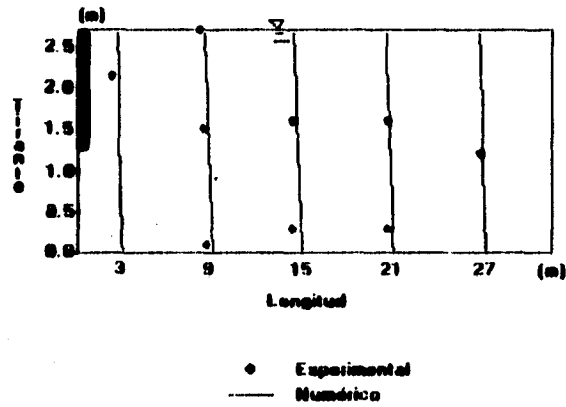


Gráfico 3.8 Comparación de los perfiles de concentración experimental y numérico.

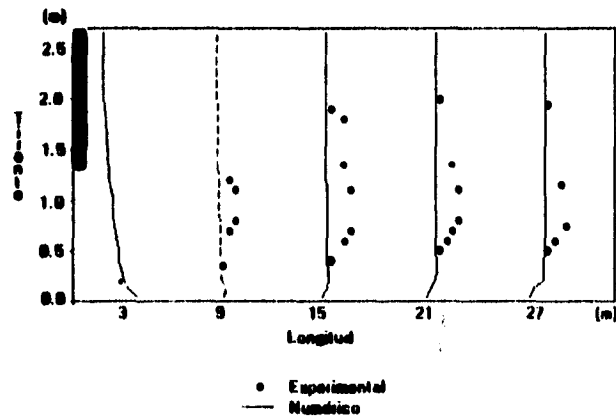


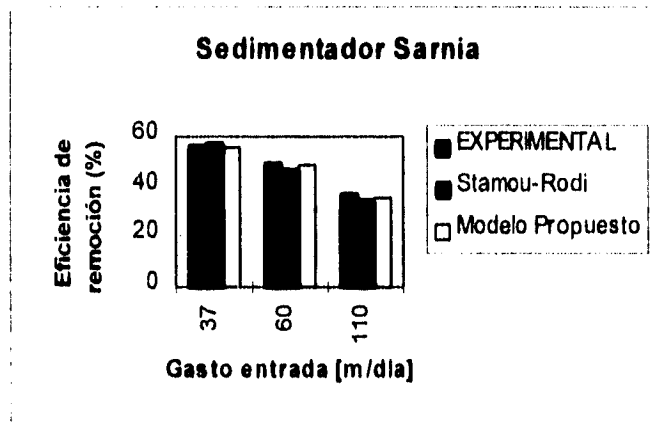
Gráfico 3.9 Comparación de los perfiles de velocidad experimental y numérico.

Esto se debe a que en la entrada hay dos flujos fuertes que originan dos zonas de recirculación en la entrada del sedimentador existen dos *baffles* separados que no llegan a la superficie del agua, no se muestran en la figura. Ambos se encuentran a una longitud de 6 a 9 metros de la entrada. Estos *baffles* inducen un patrón de flujo netamente tridimensional por lo que un estudio bidimensional propicia errores que no solo son debidos a un efecto local en esta zona, si no que se transportan a todo lo largo del sedimentador. Mientras que el modelo numérico bidimensional considera un sólo *baffle* que se extiende hasta la superficie del agua, creándose a consecuencia de esto una sola zona de recirculación que llega hasta la superficie.

No obstante estas diferencias locales, en términos de una integración del proceso de sedimentación en todo el tanque, se obtiene una muy buena correlación con la eficiencia global de remoción del sedimentador. La eficiencia de remoción se define:

$$\eta_R = \frac{C_{entrada} - C_{salida}}{C_{entrada}} \quad (3.4)$$

En la gráfica 3.10 se comparan los resultados de la eficiencia de remoción del sedimentador tanto numérico como experimental y se incluyen también los resultados numéricos de Rodi y Stamou [11]. Cabe hacer mención que la eficiencia de remoción total y la de cada fracción de sedimento concuerdan muy bien.



Gráfica 3.10 Comparación de la eficiencia de remoción entre el modelo propuesto, experimental y el del modelo de Stamou-Rodi [21]

3.2 Resuspensión de partículas.

Aunque en el fenómeno de resuspensión de partículas intervienen una gran cantidad de mecanismos y es función de varios parámetros, las expresiones semiempíricas que predicen cuando y que cantidad de sedimento se levanta del piso hacia la zona de suspensión están generalmente sólo en función de dos parámetros: el esfuerzo cortante en el piso y el tamaño de partícula.

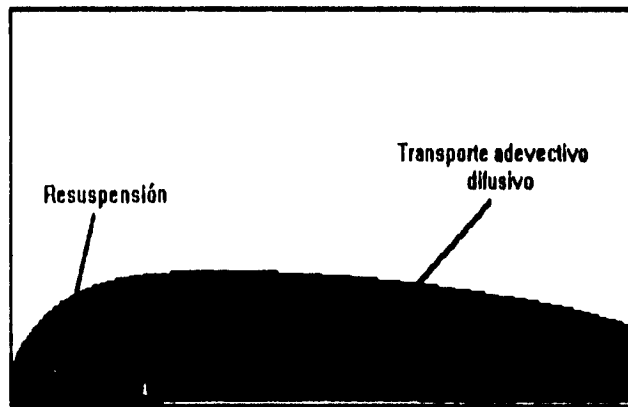


Figura 3.5 Resuspensión sin modelo de transporte de sedimento en suspensión

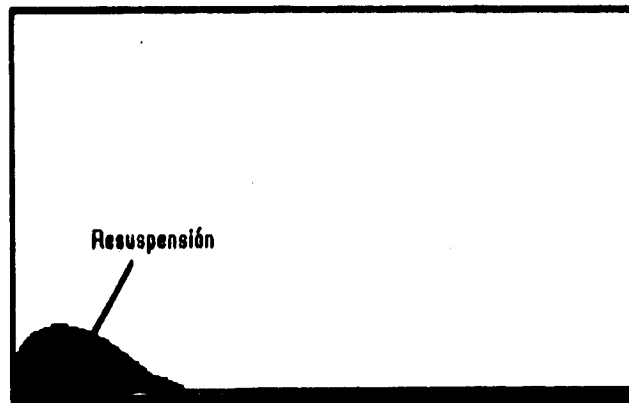


Figura 3.6 Resuspensión de sedimento con modelo de transporte de sedimento en suspensión.

Para comprobar este fenómeno se realizó la siguiente prueba numérica: se implementó el modelo de transporte por suspensión en todo el dominio computacional, introduciéndole un gasto determinado de agua con concentración cero de sedimentos. En el piso del canal se fijó una concentración, no importando su valor, pero si el tamaño del grano, ya que éste determina la velocidad de caída.

En la figura 3.5, se muestra que cuando el modelo de transporte por suspensión no ha sido implementado, la concentración de sedimento que se levantó del piso se transporta (convectiva y difusivamente) a todo el dominio, no importando la turbulencia del flujo.

Cuando el modelo ha sido implantado, el cortante en el piso que dependerá de las velocidades en el canal tiene que llegar a un valor crítico en el cual se inicia la resuspensión de partículas. La figura 3.6, se obtuvo bajo los mismos parámetros de flujo y de partícula que la figura 3.5. Se puede observar que ciertas partículas se resuspenden al inicio del canal, por un comportamiento altamente turbulento afectado por la condición de frontera. Sin embargo, cuando el flujo se estabiliza, las partículas vuelven a caer, pues los efectos turbulentos no son tan importantes para mantenerlas suspendidas, ni el esfuerzo cortante es suficientemente grande como para resuspender más.

Lo anterior se debe a que el modelo de transporte por suspensión genera un perfil en equilibrio, este perfil depende de los parámetros antes mencionados. Cuando el esfuerzo cortante es mayor a un crítico, se iniciará la resuspensión de partículas para generar con esto un perfil en equilibrio para las condiciones dadas.

Para comprobar los resultados obtenidos con este modelo se compararon los resultados con expresiones semiempíricas que relacionan el cortante y el tamaño de grano, para conocer cuando se iniciará la resuspensión. Estas expresiones son las obtenidas por Engelund [2]:

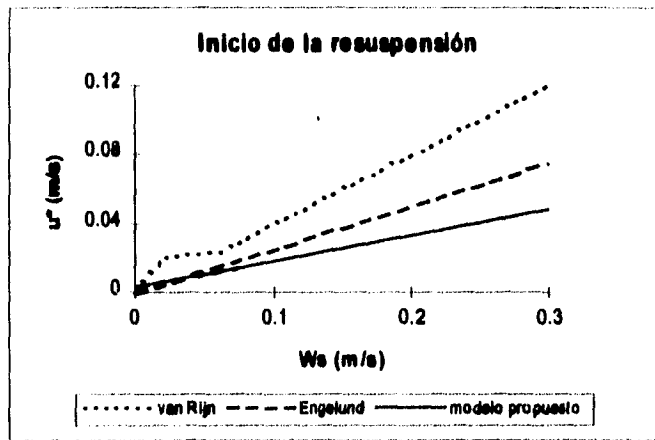
$$\frac{u_{*c}}{w_s} = 0.25 \quad (3.5)$$

y por Van Rijn[14]:

$$\begin{aligned}
 1 < D_* \leq 10: \quad \frac{u_{*c}}{w_s} &= \frac{4}{D_*} \\
 D_* > 10: \quad \frac{u_{*c}}{w_s} &= 0.4
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

Los resultados obtenidos por este modelo, se pueden expresar en una ecuación linealizada de la siguiente forma:

$$u_* = 0.149 w_s + 0.0035
 \tag{3.7}$$



Gráfica 3.11 Comparación entre los modelos de inicio de resuspensión propuestos por van Rijn, Engkund y por el presente trabajo.

En la gráfica 3.11 se comparan los resultados; se observa que la expresión que se obtuvo está por debajo de los otros dos modelos. Esto puede deberse principalmente al siguiente razonamiento: El modelo implementado no considera mecanismos y parámetros que influyen en la resuspensión de las partículas y los esfuerzos tomados por los dos autores son esfuerzos promedios en el tirante, mientras que en el caso de este modelo se toman esfuerzos puntuales en cada celda del piso.

3.3 Transporte por arrastre de fondo.

Considerando una pila rectangular, figura 3.7(a) (vista de planta), se puso como objetivo de comparación, calcular como se erosionaba el piso alrededor de la pila y se observó cualitativamente el fenómeno. Considerando que el fenómeno es simétrico, sólo se considera una mitad de la pila, figura 3.7(a). Esta comprobación se realizó para varios tamaños de sedimento y en la figura 3.7(b) a 3.7(f), se observan los resultados.

Se puede observar como aumenta la erosión al frente de la pila como muestra que ahí se incrementa la velocidad del fluido y por ende los cortantes en el piso, asemejándose mucho al fenómeno descrito por Maza y Sánchez en mediciones de erosión alrededor de pilas, cf. figura 3.8 [8]

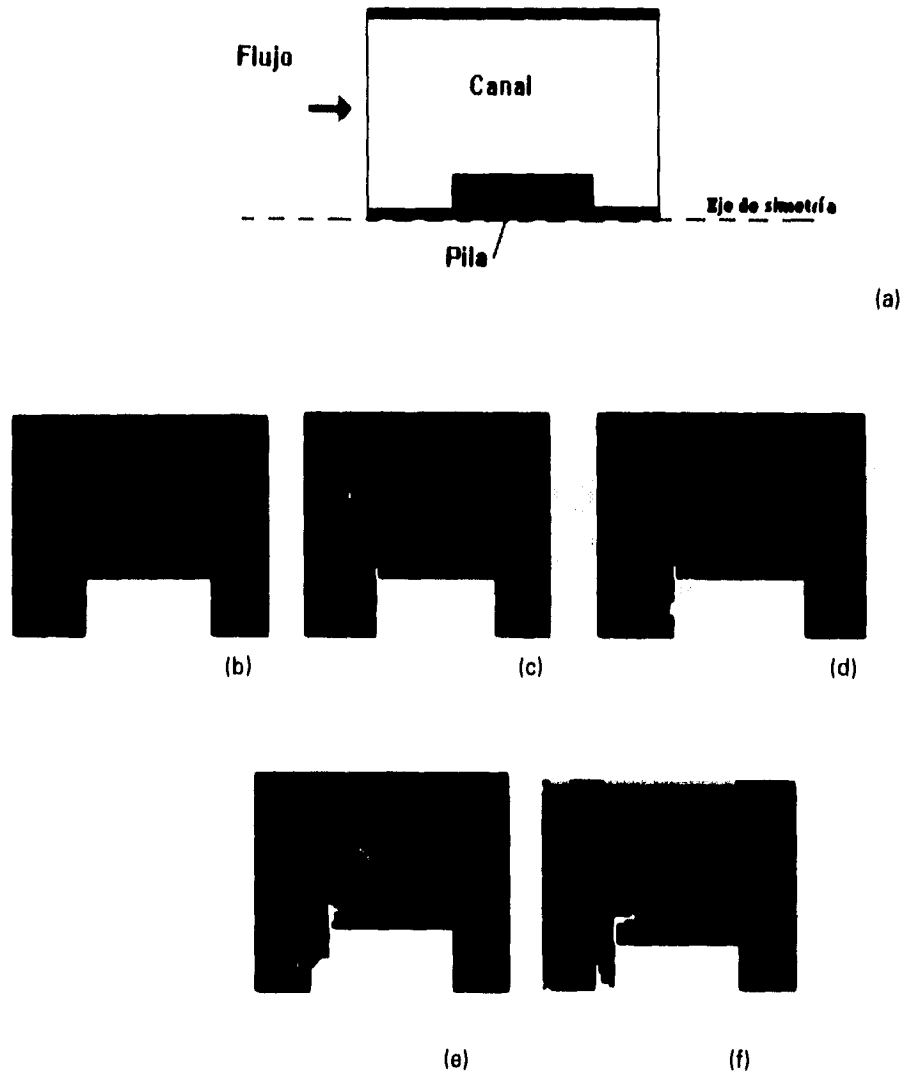


Figura 3.7 Resultado numérico de la erosión alrededor de una pila rectangular a varias velocidades del flujo. (a) Explicación del modelo numérico, (b) 0.5m/s, (c) 0.8m/s, (d) 1.0m/s, (e) 1.2m/s (f) 1.4m/s. Tamaño del sedimento 0.35mm.

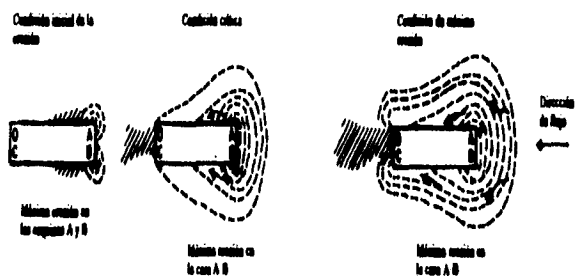


Figura 3.8 Erosión alrededor de una pila rectangular según Maza y Sánchez [8]

3.4 Comentarios finales

Para finalizar es importante mencionar que cada uno de los fenómenos anteriormente explicados se validaron en forma independiente. Como continuación de este trabajo se pretende unir todos los fenómenos que conforman el transporte de sedimento en un modelo único. Sin embargo, existen problemas donde importan uno o dos de estos fenómenos; para estos casos, el modelo propuesto en el presente trabajo es de gran ayuda.

4. CONCLUSIONES

A partir del modelo presentado en el trabajo queda satisfactoriamente resuelto el transporte de sedimento por suspensión. Este método de abordar el problema no es nuevo, pues ha sido utilizado por varios investigadores. Sin embargo, lo novedoso del modelo es que se implantó en un código numérico de tercera generación, lo que permite generalizar el método para abordar el problema de transporte de sedimento en casi cualquier geometría además de otras ventajas. En el capítulo 3 se vio al comparar los datos experimentales con los numéricos, que los errores obtenidos no son mayores al 10% lo cual está dentro del rango de precisión de las mediciones. Estos errores se obtuvieron en canales con geometrías complejas como es el caso del canal del SENTIF.

Los dos canales estudiados transportaban poca concentración de sedimentos en suspensión, lo que ayudó a que el modelo propuesto trabajara satisfactoriamente. A pesar de que no se trató el problema de cuando el flujo transporta grandes concentraciones de sedimento que pudieran afectar la hidrodinámica, dentro del cuerpo del trabajo se mencionó que es necesario para este caso la modificación de algunos parámetros hidrodinámicos en función de la concentración de sedimento como: la viscosidad, densidad o velocidad de sedimentación.

La resuspensión se basó en el cálculo del cortante en piso que cambian su morfología, lo cual es una contribución al código numérico PHOENICS. Cuando el esfuerzo cortante excede un valor crítico, el sedimento depositado se elevará hasta generar un perfil de concentraciones por suspensión en equilibrio. Según como varíe la intensidad de la turbulencia del flujo, el sedimento seguirá suspendido o se depositará de nuevo. El momento de inicio de resuspensión se compararon con expresiones semiempíricas obtenidas por van Rijn y Engelund observándose que son del mismo orden de magnitud; por lo que se puede confiar, que se tiene una buena manera de saber cuando el sedimento iniciará la resuspensión.

En cuanto al transporte por arrastre de fondo, no se tomó en cuenta la resuspensión ni la deposición. Sin embargo el comportamiento cualitativo, se asemeja mucho a lo observado experimentalmente; por lo que se consideró que era suficiente, sin olvidar que una calibración cuantitativa completará el estudio.

La verificación del modelo propuesto ha resultado satisfactoria a la luz de los resultados que se han presentado. Sin embargo, los fenómenos de resuspensión y deposición con cambios morfológicos, se han comprobado de manera independiente. Se recomienda entonces realizar pruebas para casos donde los dos fenómenos ocurren simultáneamente. Esto implica una mayor resolución numérica en cuanto al transporte vertical se refiere.

En el capítulo 2 se propuso la forma de cuantificar la deposición de sedimento en el piso, pero la cuantificación del sedimento que se resuspende, no se ha abordado. Se recomienda dos formas para abordar el problema:

- 1) Utilizando las llamadas *pick-up function*.
- 2) Utilizando un procedimiento análogo al de la deposición, a partir de una conservación de especie.

Aunque no se probaron los modelos de los fenómenos de transporte por suspensión, arrastre de fondo y resuspensión simultáneamente, con el modelo desarrollado se podrán estudiar y proponer

soluciones ingenieriles cuando en el transporte de sedimentos predomine ya sea la suspensión o bien, el arrastre de fondo.

- [1] Celik, I.; Rodi, W (1988) "Modeling Suspended Sediment Transport in Nonequilibrium Situations", *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, Vol. 114, No. 10, pp. 1157-1191..
- [2] Engelund F. (1965) "A Note on the Vedernikov's Criterion", *La Houille Blanche*, No. 6, pp. 801-802.
- [3] Graf, H (1971) "Hydraulics of Sediment Transport" McGraw Hill, USA.
- [4] Hoyal, D.; Atkinso, J.; Depinto, J.; Taylor S (1995) "Effect of turbulence on sediment deposition", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 33, No. 3, pp. 349-360.
- [5] Launder, B.E; Spalding, D.B (1974), *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol 3 pp. 269-289
- [6] Lesieur, V (1994) "Turbulence", Collection Grenoble Sciences, PUG.
- [7] Lyn A., Stamou A., Rodi W. "Density Currents and Shear Induced Flucculation in Sediment Tanks", *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, Vol 118, No. 6, pp 849-867
- [8] Maza J., (1989) "Manual de Ingeniería de Rios Capítulo 13, Erosión en rios y obras de protección", Instituto de Ingeniería UNAM
- [9] Olsen N., Skoglund M. (1994) "Three dimensional numerical modeling of water and sediment flow in a sand trap", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 32, No. 6 pp 833-844.
- [10] Patanker S, (1980) "Numerical Heat and Fluid Flow" McGraw-Hill, USA
- [11] Stamou, A.; Adams, E.; Rodi, W (1989) "Numerical Modeling of Flow and Settling in Primary Rectangular Clarifiers", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 27, No. 5, pp. 665-682.
- [12] Raudkivi, A (1993) "Sedimentation. Exclusion and Removal of Sediment from diverted water." A.A. Balkema, Rotterdam
- [13] van Rijn, L "Sediment Pick-Up Functions", *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, Vol. 110, No. 10, pp. 1494-1502.
- [14] van Rijn, Leo (1989) "Sediment Transport by Currents and Waves", Delf Hydraulics, Holland.
- [15] Vanoni, Vito (1977) "Sediment engineering", ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, New York
- [16] White, Frank (1991) "Viscous Fluid Flow", McGraw Hill, Second Edition USA.
- [17] Zyserman, J.; Fredsoe, J (1994) "Data Analysis of Bed Concentration of Suspended Sediment", *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, Vol. 120, No. 9, pp. 1021-1041

- ◆ Abdel-Gawad, S; Mccorquodale, J (1984) "Numerical Simulation of Rectangular Settling Tanks", *Journal of Hydraulic Research*, Vol.23, No.2 pp.85-97.
- ◆ Celik, I; Rodi, W (1988) "Modeling Suspended Sediment Transport in Nonequilibrium Situations", *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, Vol.114, No.10, pp.1157-1191..
- ◆ Celik, I; Rodi, W (1991) "Suspended Sediment-Transport Capacity for Open Channel Flow", *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, Vol.117, No.2, pp.191-204
- ◆ Celik, I; Rodi, W (1991), "Suspend Sediment-Transport Capacity for Open Channel Flow", *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, Vol. 117, No 2, pp 101-114.
- ◆ Chow, V (1959) "Open Channel Hydraulics", McGraw-Hill, USA. [27] Lesieur, M (1994) "Turbulence", Collection Grenoble Sciences, PUG
- ◆ DeVantier, B; Narayanaswami, R (1986) "A k-ε Based Model for Sediment Transport", Thirt International Symposium on River Sedimentation, The University of Mississippi, pp. 1407-1415.
- ◆ Engelund F. (1965) "A Note on the Vedernikov's Criterion", *La Houille Blanche*, No.6, pp.801-802.
- ◆ Graf, H (1971) "Hydraulics of Sediment Transport" McGraw Hill, USA.
- ◆ Hoyal, D; Atkinso, J; Depinto, J; Taylor S (1995) "Effect of turbulence on sediment deposition", *Journal of Hydraulic Research*, Vol.33, No.3, pp.349-360.
- ◆ Johns, B; Chescher, T.J; et al (1990) "The modelling of sandwave evolution resulting from suspended and bed load transport of sediment", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 28, No.3, pp. 335-374.
- ◆ Kerssens, P; Prins, A; van Rijn, L (1979) "Model for suspended Sediment Transport", *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, al.105, No.HY5 pp 461-476.
- ◆ Launder, B.E; Spalding, D.B (1974), *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol 3 pp.269-289
- ◆ Lesieur, V (1994) "Turbulence", Collection Grenoble Sciences, PUG.
- ◆ Lyn A., Stamou A., Rodi W. "Density Currents and Shear Induced Flucculation in Sediment Tanks", *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, Vol 118, No. 6, pp 849-867
- ◆ Mallin, M; Parry, J (1987) "Turbulent Heat and Momentum Transfer in Rough Tubes", Report CHAM/146, CHAM
- ◆ Maza J., (1989) "Manual de Ingeniería de Rios Capítulo 13, Erosión en rios y obras de protección", Instituto de Ingeniería UNAM
- ◆ Nakagawa, H; Tsujimoto, T (1980) "Sand Bed Instability due to Bed Load Motion", *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, Vol.106, No.HY12, pp.2029-2051.
- ◆ Ni, J; Wang, G (1991) "Vertical Sediment Distribution", *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, Vol.117, No.9, pp.1184-1194.
- ◆ Odgaard, J; Weng, Y (1991) "Sediment Management with Submerged Vanes I: Theory", *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, Vol.117, No.3, pp 267-282.
- ◆ Olsen N., Skoglund M. (1994) "Three dimensional numerical modeling of water and sediment flow in a sand trap", *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 32, No. 6 pp833-844.
- ◆ Stamou, A; Adams, E; Rodi, W (1989) "Numerical Modeling of Flow and Settling in Primary Rectangular Clarifiers", *Journal of Hydraulic Research*, Vol.27, No.5, pp.665-682.
- ◆ Raudkivi, A (1993) "Sedimentation. Exclusion and Removal of Sediment from diverted water." A.A.Balkema, Rotterdam
- ◆ Rosten, H; Worrel, J (1988) "Generalised Wall Functions for Turbulent Flow Including Wall Roughness", Report CHAM/PER/88/2, CHAM.
- ◆ Teisson, Ch; Latteux, B (1986) "A Depth-Integrated Bidimensional Model of Suspended Sediment Transport" Thirt International Symposium on River Sedimentation, The University of Mississippi, pp. 421-429.
- ◆ van Rijn, L "Sediment Pick-Up Funktionen", *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, Vol.110, No.10, pp.1494-1502.
- ◆ van Rijn, Leo (1989) "Sediment Transport by Currents an Waves", Delf Hydraulics, Holland.
- ◆ Vanoni, Vito (1977) "Sediment engineering", ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, New York
- ◆ White, Frank (1991) "Viscous Fluid Flow", McGraw Hill, Second Edition USA.

-
- ◆ Zhou, S; McCorquodale, J; Vtasovic, Z (1992) "Influence of Density on Circular Clarifiers with Baffles", *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, Vol. 118, No. 6, pp. 829-847
 - ◆ Zyserman, J; Fredsoe, J (1994) "Data Analysis of Bed Concentration of Suspended Sediment", *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, Vol. 120, No. 9, pp. 1021-1041

APÉNDICES

Apéndice A
Apéndice B

Q1 y GROUND para el transporte por arrastre de fondo
Q1 y GROUND para el transporte por suspensión

APÉNDICE A

Q1 y GROUND para el arrastre de fondo

Q1

```

tALK = F; RUN(1,1); VDU = 0
.....
*
* GROUP 1. Run title and other preliminaries.
*
TEXT(SEDIMENTADOR      )
*
* Si LG(1) = T tomara diferencias centradas
LG(1) = f
.....
*
* GROUP 2. Translence; time-step specification.
*
*
*
*
*
*
* GROUP 3. X-direction grid specification.
*
* Cartesian Grid Selected
steady = f
nx = 20
ny = 30
nz = 40
grdpwr(t,8,500.0,1.0)
grdpwr(x,nx,5.1,1.0)
  subgrd(x,1,10.,5.1.)
  subgrd(x,11,30.,5.1.)
grdpwr(y,ny,1.5,1.0)
  subgrd(y,1,15,0.1,1.)
  subgrd(y,16,30,0.5,1.)
grdpwr(z,nz,20.0,1.0)
  subgrd(z,1,10,20.,1.)
  subgrd(z,11,30,10.,1.)
  subgrd(z,31,40,20.,1.)
.....
*
* GROUP 6. Body-fitted coordinates or grid distortion.
  bfc = t; nonort = t; readco(GRD)
*
*
*
*
*
*
* GROUP 7. Variables stored, solved & named.
*
Solve(P1,w1,v1,u1)
  solve(c1,c2,c3)
store(c1,c2,c3,vpor)
store(c4,c5,c6)
store(enul,enut)
store(c7,c8,c9,c10,c11,c12)
  solve(c8)
terms(c8,y,n,n,n,n,n)
csg1 = s; isg2 = 4
.....
*
* GROUP 8. Terms (in differential equations) & devices.
*
*
*

```

```

.....
*
* GROUP 9. Properties of the medium (or media).
*
* Set First-Phase Density Value
RHO1 = 1.000E+03
rho1 = grnd
* Set Laminar Kinematic Viscosity
ENUL = grnd
ENUL = 1.000E-06
* get Schmidt Number for USER VARIABLE 1
* Select K-E Turbulence Model
* ENUT = CMU * (Mixing-StrLen) * K**0.5
* EL1 = (CD * K**1.5)/E
TURMOD(KEMODL)
*
.....
*
* GROUP 10. Inter-phase-transfer processes and properties.
*
.....
*
* GROUP 11. Initialization of variable or porosity fields.
*
real(uin);uin=0.500
real(kein,epsin);kein=(uin**2.0)*0.10
epsin=(0.1643*(kein)**1.5)/(0.5*1.800)
conpor(suel1,0.0,cell,1,5,1,ny,15,20)
rg(1)=8
rg(2)=12
rg(3)=1
rg(4)=22
rg(5)=30
rg(6)=40
conpor(suel2,0.0,cell,1,3,1,20,14,14)
conpor(suel3,0.0,cell,9,10,1,18,18,18)
conpor(suel4,0.0,cell,1,3,1,18,20,20)
conpor(suel5,0.0,cell,4,5,1,18,8,8)
conpor(suel3,0.0,cell,7,7,1,20,10,10)
conpor(suel2,0.0,cell,8,8,1,20,11,11)
conpor(suel3,0.0,cell,8,8,1,20,13,13)
conpor(suel4,0.0,cell,9,9,1,20,14,14)
conpor(suel5,0.0,cell,7,7,1,20,16,13)
conpor(suel6,0.0,cell,8,8,1,20,17,17)
conpor(suel7,0.0,cell,8,8,1,20,19,19)
conpor(suel8,0.0,cell,9,9,1,20,20,20)
conpor(suel9,0.0,cell,7,7,1,20,22,22)
conpor(suel10,0.0,cell,8,8,1,20,23,23)
conpor(suel11,0.0,cell,8,8,1,20,25,26)
conpor(suel12,0.0,cell,9,9,1,20,26,26)
conpor(suel13,0.0,cell,7,7,1,20,28,28)
conpor(suel14,0.0,cell,8,8,1,20,29,29)
conpor(suel15,0.0,cell,8,8,1,20,31,31)
conpor(suel16,0.0,cell,9,9,1,20,32,32)
.....
*
* GROUP 12. Convection and diffusion adjustments.
*
.....
*
* GROUP 13. Boundary conditions and special sources.
*
inifid = t
PATCH(piso,PHASEM,1,NX,1,ny,1,nz,1,15)
coval(piso,u1,grnd0,0.0)

```

```

coval(piso,v1,grnd6,0.0)
coval(piso,w1,grnd6,0.0)
  piso = skip
rg(7) = uin * 1.60
PATCH(ENT, low, 1, NX, 6, ny, 1, 1, 1, 50)
COVAL(ENT, P1, FIXFLU, 1000.0 * uin)
COVAL(ENT, w1, ONLYMS, uin)
COVAL(ENT, V1, ONLYMS, 0.000E+00)
COVAL(ENT, u1, ONLYMS, 0.000E+00)
COVAL(ENT, KE, ONLYMS, kein)
cCOVAL(ENT, EP, ONLYMS, epain)
COVAL(ENT, c1, onlyms, 0.00)
  * OUTLET Boundary Condition, Named SALIDA01
PATCH(SALIDA01, high, 1, NX, 1, NY, nz, nz, 1, 50)
COVAL(SALIDA01, P1, FIXp, 0.000E+00)
COVAL(SALIDA01, w1, ONLYMS, SAME)
COVAL(SALIDA01, u1, ONLYMS, SAME)
COVAL(SALIDA01, v1, ONLYMS, SAME)
COVAL(SALIDA01, KE, ONLYMS, SAME)
COVAL(SALIDA01, EP, ONLYMS, SAME)
COVAL(SALIDA01, c8, ONLYMS, SAME)
  * WALL Boundary Condition, Named esfuerzo
PATCH(esfuerzo, swall, 1, NX, 1, 1, 1, nz, 1, 15)
COVAL(esfuerzo, w1, grnd2, 0.000E+00)
COVAL(esfuerzo, u1, grnd2, 0.000E+00)
COVAL(esfuerzo, KE, GRND2, GRND2)
COVAL(esfuerzo, EP, GRND2, GRND2)
esfuerzo = skip
patch(esf1,swall,1,1,1,ny,1,nz,1,15)
COVAL(esf1, KE, GRND2, GRND2)
COVAL(esf1, EP, GRND2, GRND2)
COVAL(esf1, w1, grnd2, 0.000E+00)
COVAL(esf1, v1, grnd2, 0.000E+00)
patch(esf2,wwall,nx,nx,1,ny,1,nz,1,15)
COVAL(esf2, KE, GRND2, GRND2)
COVAL(esf2, EP, GRND2, GRND2)
COVAL(esf2, w1, grnd2, 0.000E+00)
COVAL(esf2, v1, grnd2, 0.000E+00)
  esf1 = skip
  esf2 = skip
patch(fric,cell, 1, NX, 1, ny, 1, nz, 1, 50)
coval(fric,u1,grnd5,0.0)
coval(fric,w1,grnd5,0.0)
  fric = skip
patch(sumidero,phasem,1,nx,1,ny,1,nz,1,15)
coval(sumidero,c8,grnd,grnd)
sumidero = skip
patch(eumsuelo,cell,1,nx,1,ny,5,nz,1,1)
coval(eumsuelo,c8,fixfu,grnd6)
eumsuelo = skip
real(frac);frac = 0.01
rg(1) = 5.500000 * frac
.....
* GROUP 14. Downstream prec1ure for PARAB = .TRUE..
*
.....
* GROUP 15. Termination of sweeps.
*
LSWEEP = 30
  restrt(all)
RESREF(P1) = 1.000E-10
RESREF(w1) = 1.000E-10
RESREF(V1) = 1.000E-10
RESREF(u1) = 1.000E-10
RESREF(KE) = 1.000E-10

```

RESREF(EP) = 1.000E-10
 RESREF(c1) = 1.000E-10
 rg(10) = .00035
 rg(11) = 1.6
 rg(12) = .014
 rg(13) = 0.03

.....

• GROUP 16. Termination of iterations.

• Linear Iterations and Termination Criterion for P1

• GROUP 17. Under-relaxation devices.

• Automatic False-Time-Step Relaxation Applied to U1

relax(p1,nirfx,0.8000)

REAL(SCALEL,SCALEU);SCALEL= 1.001E+00;SCALEU= 1.000E-00

RELAX(w1,FALSDT, 3.000E+00*SCALEL/SCALEU)

RELAX(v1,FALSDT, 3.000E+00*SCALEL/SCALEU)

RELAX(u1,FALSDT, 3.000E+00*SCALEL/SCALEU)

RELAX(KE,FALSDT, 1.000E-02*SCALEL/SCALEU)

RELAX(EP,FALSDT, 1.000E-02*SCALEL/SCALEU)

RELAX(c1,FALSDT, 1.000E+18*SCALEL/SCALEU)

RELAX(c2,FALSDT, 1.000E+18*SCALEL/SCALEU)

RELAX(c3,FALSDT, 1.000E+18*SCALEL/SCALEU)

.....

• GROUP 18. Limits on variables or increments to them.

• GROUP 19. Data communicated by satellite to GROUND.

• GROUP 20. Preliminary print-out.

• Activate Printout of Satellite Data.

ECHO = T

• GROUP 21. Print-out of variables.

• Printout for the PREc1URE

OUTPUT(P1,y,N,N,Y,Y,Y)

OUTPUT(w1,y,N,N,Y,Y,Y)

OUTPUT(v1,y,N,N,Y,Y,Y)

OUTPUT(u1,y,N,N,Y,Y,Y)

OUTPUT(KE,n,N,N,Y,Y,Y)

OUTPUT(EP,n,N,N,Y,Y,Y)

OUTPUT(c1,n,N,N,Y,Y,Y)

OUTPUT(c2,n,N,N,Y,Y,Y)

OUTPUT(c3,n,N,N,Y,Y,Y)

OUTPUT(c4,n,N,N,Y,Y,Y)

OUTPUT(c5,n,N,N,Y,Y,Y)

OUTPUT(c6,n,N,N,Y,Y,Y)

OUTPUT(c7,n,N,N,Y,Y,Y)

OUTPUT(c8,n,N,N,Y,Y,Y)

OUTPUT(c9,n,N,N,Y,Y,Y)

OUTPUT(c10,n,N,N,Y,Y,Y)

OUTPUT(c11,n,N,N,Y,Y,Y)

```

OUTPUT(c12,n,N,N,Y,Y)
OUTPUT(enul,n,N,N,Y,Y)
OUTPUT(enut,n,N,N,Y,Y)

*
*.....
*
* GROUP 22. Spot-value print-out.
*
* X-Direction Index of Spot-Value
IXMON = 9
* Y-Direction Index of Spot-Value
IYMON = 6
*
*.....
*
* GROUP 23. Field print-out and plot control.
*
* Frequency of tabulation/plots of Spot/Residuals Values
* (DO NOT Reset)
NPLT = 1
* Print TABLES AND PLOTS of Spot-Values and Residuals
ITABL = 3
*
*.....
*
* GROUP 24. Preparations for continuation runs.
*
* Save the Final Flow Field In a RE-START File
SAVE = T; NSAVE = CHAM
*
*.....
STOP

```

GROUND

```

C 2 User dimensions own arrays here, for example:
C
C DIMENSION GUH(10,10),GUC(10,10),GUX(10,10),GUZ(10)
PARAMETER (NPNAM=1000)
PARAMETER(NXDIM=100,NYDIM=100)
DIMENSION GSEDIM(NYDIM,NXDIM),GYCOOR(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION gca(NYDIM,NXDIM),gci(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION gseval(NYDIM,NXDIM),gsc2(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION gsc3(NYDIM,NXDIM),gsc4(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION gvok(NYDIM,NXDIM),gsc2(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION gsc5(NYDIM,NXDIM),gci(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION gsc6(NYDIM,NXDIM),gsc5(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION gw1(NYDIM,NXDIM), gxx(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION gnor(NYDIM,NXDIM),gsc7(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION gsc8(NYDIM,NXDIM),gsc3(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION gvis(NYDIM,NXDIM),gw1(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION genu(NYDIM,NXDIM), gw1(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION gvpor(NYDIM,NXDIM),ggj(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION gsc9(NYDIM,NXDIM),gsc6(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION gsc6(NYDIM,NXDIM),gdc(nydim,nxdim)
DIMENSION gvak(NYDIM,NXDIM),gsc6(nydim,nxdim)
DIMENSION gv1(NYDIM,NXDIM),enuk(nydim,nxdim)
DIMENSION gsc4(NYDIM,NXDIM),gac(nydim,nxdim)

```

```

DIMENSION gah(NYDIM,NXDIM),gan(nydim,nxdim)
DIMENSION glah(NYDIM,NXDIM),gskin(nydim,nxdim)
DIMENSION gke(NYDIM,NXDIM),gskco(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION gkval(NYDIM,NXDIM),gep(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION gke(NYDIM,NXDIM),ghw1(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION ghc6(NYDIM,NXDIM),glc4(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION givpor(NYDIM,NXDIM),ghvpor(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION gcoval(NYDIM,NXDIM),glc1(nydim,nxdim)
DIMENSION gcl1(NYDIM,NXDIM)
RETURN
C*****
C
C--- GROUP 1. Run title and other preliminaries
C
  I GO TO (1001,1002),ISC
1001 CONTINUE
  call make(yg2d)
  call make(grsp1)
  call make(grsp2)
  call make(dxu2d)
  call make(dyv2d)
C*****
C----- SECTION 6 ----- coefficient = GRNDS
c  OBTIENE EL COEFICIENTE DE FRICCION S
  call getyx(u1,gu1,nydim,nxdim)
  call getyx(w1,gw1,nydim,nxdim)
  call getyx(anorth,gan,nydim,nxdim)
  call getyx(grsp2,gskin,nydim,nxdim)
  if(bfc) then
  call gtizyx(69,izstep,gycoor,nydim,nxdim)
  else
  call getyx(yg2d,gycoor,nydim,nxdim)
  endif
  do jx=1,nx
  do jy=1,ny
    gvel=((gu1(jy,jx)**2+gw1(jy,jx)**2)**0.5)
  c    write(6,*)gvel,jy
    if(gvel.gt.1e-4) then
      gy=jy+1
      gre=gvel*((gycoor(jy,jx)-gycoor(jy-1,jx))/2)/enul
  c    write(6,*)gre
      if(gre.le.132.5) then
        gskin(jy,jx)=1/gre
  c    write(6,*)gskin(jy,jx),'laminar'
        do ty=gy,ny
          gskin(ty,jx)=0.0
        end do
        goto 334
      else
  c    gtt=0.
  c    gtt=gtt+1.
  c    gsk1=gskin(jy,jx)
  c    write(6,*)gsk1,'inicial',jx,iy,iz
    gsk2=(0.435/alog(1.01+9.0*gre*gsk1**0.5))**2.

```

```

      gskdif=abs(gsk1-gsk2)
      if(gskdif.gt.1e-5) then
        gskin(jy,jx)=gsk2
        goto 333
      else
c       write(6,*)gskin(jy,jx),gw1(jy,jx),jx,jy
        gskin(jy,jx)=gsk2
c       write(6,*)gtt,gsk2,ix,iy,iz
        do ty=gy,ny
          gskin(ty,jx)=0.0
        end do
        goto 334
      end if
    end if
  else
    gskin(jy,jx)=0.0
  end if
end do
334 end do
do jy=1,ny
do jx=1,nx
  if(jx.eq.1) then
    gvel=(gul(jy,jx)**2+gw1(jy,jx)**2)**0.5
  else if(jx.eq.nx) then
    gvel=-((gul(jy,jx-1)**2+gw1(jy,jx)**2)**0.5
  else
    gvel =(((gul(jy,jx-1)+gul(jy,jx))/2)**2+
& gw1(jy,jx)**2)**0.5
  end if
c  OBTENCION DE COEFICIENTE AREA*S*RHO*VELOCIDAD
  gskco(jy,jx)=gan(jy,jx)*
c  gskco(jy,jx)=
& gskin(jy,jx)*rhol*gvel
end do
end do
call setyx(co,gskco,nydim,nxdim)
call setyx(grsp2,gskin,nydim,nxdim)
RETURN
136 CONTINUE
C----- SECTION 7 ----- coefficient = GRND6
c  CELDAS CON UN VALOR MAYOR A CIERTO PARAMETRO, SON PISO y
C  LAS VELOCIDADES SE SUPRIMEN.
call getyx(c4,gc4,nydim,nxdim)
call getyx(c1,gc1,nydim,nxdim)
if(istep.eq.1) then
do jx = 1,nx
do jy= 1,ny
  if(gc4(jy,jx).ge. 0.50) then
    gcoval(jy,jx)=1e10
  else
    gcoval(jy,jx)=0.0
  end if
end do
end do
end do

```

```

else
do jx=1,nx
do jy=1,ny
if(gc4(jy,jx).ge. gc1(1,jx)) then
gcovak(jy,jx)=1e10
else
gcovak(jy,jx)=0.0
end if
end do
end do
end if
call setyx(co,gcovak,nydim,nxdim)
RETURN
C *----- SECTION 3 ---- Start of iz slab.
c ***** Condiciones iniciales de factor de friccion*****
if(isweep.le.4) then
call getyx(grsp2,gskin,nydim,nxdim)
do jy=1,ny
do jx=1,nx
gskin(jy,jx)=3e-3
end do
end do
call setyx(grsp2,gskin,nydim,nxdim)
end if
c ***** Condiciones de ke y ep *****
if(isweep.gt.4) then
call getyx(u1,gu1,nydim,nxdim)
call getyx(w1,gw1,nydim,nxdim)
call getyx(ke,gke,nydim,nxdim)
call getyx(ep,gep,nydim,nxdim)
call getyx(grsp2,gskin,nydim,nxdim)
if(bfc) then
call gtizyx(69,izstep,gycoor,nydim,nxdim)
else
call getyx(yg2d,gycoor,nydim,nxdim)
end if
do jx=1,nx
do jy=1,ny
gvel=((gu1(jy,jx)**2+gw1(jy,jx)**2)**0.5)
if(gvel.gt.1e-4) then
gke(jy,jx)=(gskin(jy,jx)*
& (gu1(jy,jx)**2+gw1(jy,jx)**2))/(0.09**0.5)
gcp(jy,jx)=((gke(jy,jx)**1.5)*(1.643/0.41))
& /(gycoor(jy,jx)-gycoor(jy-1,jx))
c write(6,*) gke(jy,jx),gcp(jy,jx),jx,jy,iz
goto 336
else
gke(jy,jx)=gke(jy,jx)
gcp(jy,jx)=gcp(jy,jx)
end if
end do
336 end do
call setyx(ke,gke,nydim,nxdim)
call setyx(ep,gep,nydim,nxdim)

```



```

end if
c *****CONDICIONES INICIALES DE C4 *****
if(isweep.lt.5) then
if(istep.eq.1) then
call getyx(c4,gc4,nydim,nxdim)
do jx=1,nx
do jy=1,5
gc4(jy,jx)=0.6
end do
end do
call setyx(c4,gc4,nydim,nxdim)
else
call getyx(old(c4),glc4,nydim,nxdim)
call getyx(old(c1),glc1,nydim,nxdim)
do jx=1,nx
c write(6,*)glc1(jy,jx),jx,jy,iz
do jy=1,ny
gc4(jy,jx)=glc4(jy,jx)
glc1(jy,jx)=glc1(jy,jx)
end do
end do
call setyx(c4,gc4,nydim,nxdim)
call setyx(c1,glc1,nydim,nxdim)
end if
end if
RETURN
C * -----o----- SECTION 6 ---- Finish of iz slab.
if(iz.eq.nz) return
if(isweep.eq.LSWEEP) THEN
c if(isweep.eq.55) THEN
call getyx(u1,gu1,nydim,nxdim)
call getyx(v1,gv1,nydim,nxdim)
call getyx(w1,gw1,nydim,nxdim)
call getyx(vist,genut,nydim,nxdim)
call getyx(wl,gwl,nydim,nxdim)
call getyx(ahigh,gcra,nydim,nxdim)
call getyx(grsp2,gskin,nydim,nxdim)
call getyx(aeast,gcro,nydim,nxdim)
call getyx(c1,gc1,nydim,nxdim)
call getyx(c1l,gc1l,nydim,nxdim)
call getyx(grsp1,ggj,nydim,nxdim)
call getyx(c5,gc5,nydim,nxdim)
call getyx(c6,gc6,nydim,nxdim)
call getyx(low(c6),glc6,nydim,nxdim)
call getyx(high(c6),glc6,nydim,nxdim)
call getyx(c7,gc7,nydim,nxdim)
call getyx(c8,gc8,nydim,nxdim)
call getyx(dxu2d,gdx,nydim,nxdim)
call getyx(dyv2d,gdc,nydim,nxdim)
call getyx(c4,gc4,nydim,nxdim)
call getyx(c3,gc3,nydim,nxdim)
call getyx(aeast,gae,nydim,nxdim)
call getyx(anorth,gan,nydim,nxdim)
call getyx(ahigh,gah,nydim,nxdim)

```

```

call getyx(low(ahigh),glah,nydim,nxdim)
call getyx(c7,gc7,nydim,nxdim)
call getyx(vpor,gvpor,nydim,nxdim)
call getyx(high(vpor),ghvpor,nydim,nxdim)
call getyx(low(vpor),glvpor,nydim,nxdim)
call getyx(vol,gvol,nydim,nxdim)
if(bfc) then
  call gtizyx(69,izstep,gycoor,nydim,nxdim)
else
  call getyx(yg2d,gycoor,nydim,nxdim)
end if
do jx=1,nx
  do jy=1,ny
    gww=(gw1(jy,jx)**2+gul(jy,jx)**2)**0.5
    if (gww.ge. 1.0e-4) then
c      write(6,*)gw1(jy,jx),gul(jy,jx),gww,gskin(jy,jx)
      gptz=rho1*gskin(jy,jx)*gww*abs(gw1(jy,jx))
      gptx=rho1*gskin(jy,jx)*gww*abs(gul(jy,jx))
c      write(6,*)gptx,gptz
      gc7(1,jx)=jy-1
      gj=jy-1
c      write(6,*) gc7(1,jx)
      goto 234
    end if
  end do
c *****CALCULO DE D*****
234  gda=(25.3e3)*rg(10)
c *****ESFUERZO CRITICO DE SHIELDS*****
  if ((gda .gt. 1) .and. (gda .le. 4)) then
    gshc=0.24*gda**-1
  else if ((gda .gt. 4) .and. (gda .le. 10)) then
    gshc=0.14*gda**(-0.64)
  else if ((gda .gt. 10) .and. (gda .le. 20)) then
    gshc=0.04*gda**(-0.1)
  else if ((gda .gt. 20) .and. (gda .le. 150)) then
    gshc=0.013*gda**0.29
  else
    gshc=0.055
  end if
c **CALCULO DEL ESFUERZO CRITICO PROMEDIO EN EL TIEMPO**
  getc=1650.*9.81*rg(10)*gshc
c ***CALCULO PARAMETRO ADIMENSIONAL DEL E. CORTANTE*****
  gtx=(gptx-getc)/getc
  if (gtx.lt.0.0) then
    gtx=0.0
  end if
  gtz=(gptz-getc)/getc
  if (gtz.lt.0.0) then
    gtz=0.0
  end if
c      write(6,*)'tau',getc,gptx,gptz
c *****CALCULO DE LA CONCENTRACION Cb*****
  gcbx=0.65*0.18*(gtx/gda)
  gcbz=0.65*0.18*(gtz/gda)

```

```

if (gcbx.gt.gcbz) then
  gcb=gcbx
else
  gcb=gcbz
end if
if(gcb.lt.1e-3) then
  gcb=0.6
end if
  gcl(1,jx)=gcb
c   write(6,*)gcl(1,jx),jx,iz
c * *****VELOCIDAD ub*****
  gubx=(((1.65)*9.8*rg(10))**0.5)*1.5*gtx**0.6
  gubz=(((1.65)*9.8*rg(10))**0.5)*1.5*gtz**0.6
c   write(6,*)cu',gcb,gubx,gubz
c * *****altura*****
  gdelbx=rg(10)*(0.3*(gda**0.7)*gtx**0.5)
  gdelbz=rg(10)*(0.3*(gda**0.7)*gtz**0.5)
  gxy=(gdelbx/gdc(gj,jx))*gubx*gcb
  gu=gul(gj,jx)
  if (gu.gt.0.0) then
    if(gvpor(gj,jx+1).eq.0.0) then
      gc5(1,jx)=0.0
    else
      gc5(1,jx)=gxy*gcro(gj,jx)
    end if
  else
    if(gvpor(gj,jx-1).eq.0.0) then
      gc5(1,jx)=0.0
    else
      gc5(1,jx)=-gxy*gcro(gj,jx)
    end if
  end if
  gzy=(gdelbz/gdc(gj,jx))*gubz*gcb
  gw=gw1(gj,jx)
  if (gw.gt.0.0) then
    if(ghvpor(gj,jx).eq.0.0) then
      gc6(1,jx)=0.0
    else
      gc6(1,jx)=gzy*gcra(gj,jx)
    end if
  else
    if(glvpor(gj,jx).eq.0.0) then
      gc6(1,jx)=0.0
    else
      gc6(1,jx)=-gzy*gcra(gj,jx)
    end if
  end if
c   write(6,*)gc5(1,jx),gc6(1,jx),iz
  gg5=gc5(1,jx)
  ggw5=gc5(1,jx-1)
  gge5=gc5(1,jx+1)
  gg6=gc6(1,jx)
  ggl6=glc6(1,jx)
  ggh6=ghc6(1,jx)

```

```

c      write(6,*)gg5,ggw5,gge5,gg6,gg16,gg6
      if (gul(gj,jx).ge.0.0) then
          ggx=abs(ggw5)
      else
          ggx=abs(gge5)
      end if
      if (gw1(gj,jx).gt.0.0) then
          ggz=abs(gg16)
      else
          ggz=abs(gg6)
      end if
c      write(6,*)ggz,ggx,abs(gg6),abs(gg5)
c      *****FLUJO NETO DE SEDIMENTO EN CADA CELDA*****
          gvalu=ggz+ggx-abs(gg6)-abs(gg5)
c      ***** GANANCIA DE CONCENTRACION EN CADA CELDA *****
          gcon=(gvalu*dt)/gvol(gj,jx)
c      write(6,*)gvalu,gcon,iz,jx
          gcl1(1,jx)=gcon
c      write(6,*)gvalu,gcon
      end do
      call setyx(c5,gc5,nydim,nxdim)
      call setyx(c6,gc6,nydim,nxdim)
      call setyx(c1,gc1,nydim,nxdim)
      call setyx(c11,gc11,nydim,nxdim)
      call setyx(c7,gc7,nydim,nxdim)
c      ** ELIMINACION DE CONCENTRACIONES MAYORES A Cmax o NEGATIVAS*
c      if(isweep.eq.LSWEEP-1.OR.ENUFSW) THEN
          call getyx(c4,gc4,nydim,nxdim)
          call getyx(c7,gc7,nydim,nxdim)
          call getyx(c1,gc1,nydim,nxdim)
          call getyx(c11,gc11,nydim,nxdim)
          do jx=1,nx
              do jy=1,ny
                  if(jy.eq.gc7(1,jx)) then
                      gc4(jy,jx)=gc11(1,jx)+gc4(jy,jx)
c                      write(6,*)gc7(1,jx),gc11(1,jx),gc4(jy,jx),jx,jy,iz
                  else
                      gc4(jy,jx)=gc4(jy,jx)
                  end if
              end do
          end do
          do jx=1,nx
              do jy=1,ny
                  if (gc4(jy,jx).gt.0.6) then
                      gc4(jy+1,jx)=gc4(jy+1,jx)+(gc4(jy,jx)-0.6)
                      gc4(jy,jx)=0.6
                  end if
              end do
          end do
          do jx=1,nx
              do jy=ny,1,-1
                  if (gc4(jy,jx).lt.0.0) then
                      gc4(jy-1,jx)=gc4(jy-1,jx)+gc4(jy,jx)
                      gc4(jy,jx)=0.0
                  end if
              end do
          end do
      end if
  
```

```
    end if
  end do
end do
do jx=1,nx
c  write(6,*)gc1(jy,jx),gc3(jx,jy),jx,jy,iz
  gccb=gc1(1,jx)
  do jy=1,ny
c  write(6,*)gc1(jy,jx),gc3(jx,jy),jx,jy,iz
    if(gc4(jy,jx).ge.gccb) then
      gc3(jy,jx)=0.0
    else
      gc3(jy,jx)=1.0
    end if
  end do
end do
call setyx(c4,gc4,nydim,nxdim)
call setyx(c3,gc3,nydim,nxdim)
end if
return
C.....
```

APÉNDICE B

Q1 y GROUND PARA TRANSPORTE POR SUSPENSIÓN

Q1

```

TALK=F;RUN(1,1);VDU=0
.....
*
*   GROUP 1. Run title and other preliminaries.
*
TEXT(SEDIMENTADOR      )
*
*   Si LG(1)=T tomara diferencias contradas
LG(1)=f
.....
*
*   GROUP 2. Translencia; time-step specification.
*
*
*
*
*   GROUP 3. X-direction grid specification.
*
*   Cartesian Grid Selected
steady=t
nx=11
ny=21
nz=60
.....
*
*   GROUP 6. Body-fitted coordinates or grid distortion.
*
BFC=T;READCO(GRID)
NONORT=T
.....
*
*   GROUP 7. Variables stored, solved & named.
*
Solve(P1,w1,v1,u1)
solve(c1,c2,c3,c4,c5,c6)
solve(c7,c8,c9,c10,c11,c12)
store(c13,c14,c15,c16,c17,c18)
store(c19,c20,c21,c22,c23,c24,c25,c26)
store(c27,c28)
store(enul,enut)
      term(c1,y,y,n,p,p)
csg1=k;lag2=1
.....
*
*   GROUP 8. Terms (in differential equations) & devices.
*
*
*
*
*   GROUP 9. Properties of the medium (or media).
*
*   Set First-Phase Density Value
RHO1= 9.980E+02
rho1=grnd
*   Set Laminar Kinematic Viscosity
ENUL= 1.080E-06
ENUL=grnd
*   Set Schmidt Nurnber for USER VARIABLE 1
    
```

```

PRT(c1)=0.90
PRT(c2)=0.90
PRT(c3)=0.90
PRT(c4)=0.90
  PRNDTL(c1)=1.000
  PRT(C1)=1.00
  * Select K-E Turbulence Model
  * ENUT = CMU * (Mixing-StrLen) * K**0.5
  * EL1 = (CD * K**1.5)/E
TURMOD(KEMODL)
  enut=grnd
  *
  store(c1)
  store(ke,ep)
  store(p1,v1,w1)
  .....
  *
  * GROUP 10. Inter-phase-transfer processes and properties.
  *
  .....
  *
  * GROUP 11. Initialization of variable or porosity fields.
  *
real(uin);uin=1.3
real(kein,epsin);kein=(uin**2.0)*0.30
epsin=(0.1643*(kein)**1.5)/(0.1*0.5400)
  .....
  *
  * GROUP 12. Convection and diffusion adjustments.
  *
  .....
  *
  * GROUP 13. Boundary conditions and special sources.
  *
rg(7)=uin*1.60
PATCH(ENT, low, 1, NX, 1, ny,1,1,1,15)
COVAL(ENT, P1, FIXFLU,RHO1* uin)
COVAL(ENT, w1, ONLYMS, uin)
COVAL(ENT, V1, ONLYMS, 0.000E+00)
COVAL(ENT, u1, ONLYMS, 0.000E+00)
COVAL(ENT, KE, ONLYMS, kein)
COVAL(ENT, EP, ONLYMS, epsin)
COVAL(ENT, c1, ONLYMS, 0.0001068)
COVAL(ENT, c2, ONLYMS, 0.0001068)
COVAL(ENT, c3, ONLYMS, 0.0001068)
COVAL(ENT, c4, ONLYMS, 0.0001068)
COVAL(ENT, c5, ONLYMS, 0.0001068)
COVAL(ENT, c6, ONLYMS, 0.0001068)
COVAL(ENT, c7, ONLYMS, 0.0001068)
COVAL(ENT, c8, ONLYMS, 0.0001068)
COVAL(ENT, c9, ONLYMS, 0.0001068)
COVAL(ENT, c10, ONLYMS, 0.0001068)
COVAL(ENT, c11, ONLYMS, 0.0001068)
COVAL(ENT, c12, ONLYMS, 0.0001068)
PATCH(ENT1, low, 1, NX, 1, 1,1,nz,1,15)
COVAL(ENT1, c1, fixval, 0.100)
COVAL(ENT1, c2, fixval, 0.100)
COVAL(ENT1, c3, fixval, 0.100)
COVAL(ENT1, w1, fixval, 0.000)
COVAL(ENT1, vt, fixval, 0.100)
ent1=skip
  * OUTLET Boundary Condition, Named SALIDA01
PATCH(SALIDA01, high, 1, NX, 1, NY,nz,nz,1,15)
COVAL(SALIDA01, P1, FIXp, 0.000E+00)
COVAL(SALIDA01, w1, ONLYMS,SAME)

```



```

RESREF(EP) = 1.000E-10
RESREF(c1) = 1.000E-10
rg(10) = .0004
rg(11) = 1.8
rg(12) = .014
rg(13) = 0.03

```

```

.....
*
* GROUP 16. Termination of iterations.
*
* Linear-Iterations and Termination Criterion for P1
.....

```

```

* GROUP 17. Under-relaxation devices.
*
* Automatic False-Time-Step Relaxation Applied to U1
REAL(SCALE,SCALEU);SCALE = 1.000E+00;SCALEU = 1.000E-00
RELAX(w1,FALSDT, 1.000E+00*SCALE/SCALEU)
RELAX(V1,FALSDT, 1.000E+00*SCALE/SCALEU)
RELAX(u1,FALSDT, 1.000E+00*SCALE/SCALEU)
RELAX(KE,FALSDT, 1.000E-00*SCALE/SCALEU)
RELAX(EP,FALSDT, 1.000E-00*SCALE/SCALEU)
RELAX(c1,FALSDT, 1.000E+01*SCALE/SCALEU)
RELAX(c2,FALSDT, 1.000E+01*SCALE/SCALEU)
RELAX(c3,FALSDT, 1.000E+01*SCALE/SCALEU)
RELAX(c4,FALSDT, 1.000E+01*SCALE/SCALEU)
RELAX(c5,FALSDT, 1.000E+01*SCALE/SCALEU)
RELAX(c6,FALSDT, 1.000E+01*SCALE/SCALEU)
RELAX(c7,FALSDT, 1.000E+01*SCALE/SCALEU)
RELAX(c8,FALSDT, 1.000E+01*SCALE/SCALEU)
RELAX(c9,FALSDT, 1.000E+01*SCALE/SCALEU)
RELAX(c10,FALSDT, 1.000E+01*SCALE/SCALEU)
RELAX(c11,FALSDT, 1.000E+01*SCALE/SCALEU)
RELAX(c12,FALSDT, 1.000E+01*SCALE/SCALEU)

```

```

.....
*
* GROUP 18. Limits on variables or increments to them.
*
.....

```

```

* GROUP 19. Data communicated by satellite to GROUND.
*
.....
* GROUP 20. Preliminary print-out.
*
* Activate Printout of Satellite Data.

```

ECHO = T

```

.....
*
* GROUP 21. Print-out of variables.
*
* Printout for the PREc1URE

```

```

OUTPUT(P1,n,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(w1,n,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(V1,n,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(u1,n,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(KE,n,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(EP,n,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(c1,y,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(c2,y,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(c3,y,N,N,Y,Y,Y)

```

```

OUTPUT(c4,y,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(c5,y,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(c6,y,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(c7,y,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(c8,y,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(c9,y,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(c10,y,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(c11,y,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(c12,y,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(c13,y,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(c14,y,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(c15,y,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(c16,y,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(c17,y,N,N,Y,Y,Y)

```

```

*
*.....
*
* GROUP 22. Spot-value print-out.
*
* X-Direction Index of Spot-Value
IXMON = 59
* Y-Direction Index of Spot-Value
IYMON = 26
*
*.....
*
* GROUP 23. Field print-out and plot control.
*
* Frequency of tabulation/plots of Spot/Residuals Values
* (DO NOT Reset)
NPLT = 1
* Print TABLES AND PLOTS of Spot-Values and Residuals
ITABL = 3
*
*.....
*
* GROUP 24. Preparations for continuation runs.
*
* Save the Final Flow Field in a RE-START File
SAVE = T; NSAVE = CHAM
*
*.....
STOP

```

GROUND

C 2 User dimensiona own arrays here, for example:

C

c ARREGLOS QUE SE UTILIZAN EN EL PROGRAMA

```

PARAMETER (NPNAM=1000)
PARAMETER(NXDIM=100,NYDIM=100)
DIMENSION GSEDIM(NYDIM,NXDIM),GYCOOR(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION gca(NYDIM,NXDIM),grc1(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION gaeval(NYDIM,NXDIM),grc2(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION grc3(NYDIM,NXDIM),grc4(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION gvol(NYDIM,NXDIM),gc2(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION grc5(NYDIM,NXDIM),gc1(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION gcra(NYDIM,NXDIM),gc5(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION gw1(NYDIM,NXDIM), gxx(NYDIM,NXDIM)

```

```

DIMENSION gnor(NYDIM,NXDIM),gc7(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION gc8(NYDIM,NXDIM),gc3(NYDIM,NXDIM)
DIMENSION gvia(NYDIM,NXDIM)
C.....
C
C--- GROUP 1. Run title and other preliminaries
C
  I GO TO (1001,1002),ISC
1001 CONTINUE
  call make(yg2d)
  call make(grsp1)
  call make(grsp2)
  call make(grsp3)
  call make(grsp4)
C.....
C----- SECTION 1 ----- coefficient = GRND

c SUMIDERO DE LA CONCENTRACION:  $V_s/dy(Cy+1-2Cy+Cy-1)$ 
c COEFICIENTE  $V_s/dy$ 
c LG(1)=T implica diferencias centradas; F es hacia adelante
  if(indvar.eq.c1) then
    gvs=rg(1)
  else if(indvar.eq.c4) then
    gvs=rg(2)
  else if(indvar.eq.c7) then
    gvs=rg(3)
  else if(indvar.eq.c10) then
    gvs=rg(4)
  endif
  if(bfc) then
    call gtizyx(69,izatep,gycoor,nydim,nxdim)
  else
    call getyx(yg2d,gycoor,nydim,nxdim)
  endif
  IF(LG(1)) THEN
    do jx=1,nx
      do jy=1,ny
        gdy=gycoor(jy+1,jx)-gycoor(jy-1,jx)
        if(jy.eq.1) gdy=gycoor(jy+1,jx)-gycoor(jy,jx)
        if(jy.eq.ny) gdy=gycoor(jy,jx)-gycoor(jy-1,jx)
        gsedim(jy,jx)=gvs/gdy
      end do
    end do
  ELSE
    do jx=1,nx
      do jy=1,ny
        gdy=gycoor(jy+1,jx)-gycoor(jy,jx)
        if(jy.eq.ny) gdy=gycoor(jy,jx)-gycoor(jy-1,jx)
        gsedim(jy,jx)=gvs/gdy
      end do
    end do
  ENDIF
c GUARDA EL COEFICIENTE EN GRSP* PARA CADA CONCENTRACION
  if (indvar.eq.c1) then

```

```

call setyx(grsp1,gsedim,nydim,nxdim)
else if(indvar.eq.c4) then
call setyx(grsp2,gsedim,nydim,nxdim)
else if(indvar.eq.c7) then
call setyx(grsp3,gsedim,nydim,nxdim)
else if(indvar.eq.c10) then
call setyx(grsp4,gsedim,nydim,nxdim)
end if
call setyx(co,gsedim,nydim,nxdim)
RETURN
131 CONTINUE
C----- SECTION 12 ----- value = GRND
C.....
c SUMIDERO DE LA CONCENTRACION DE SEDIMENTOS : Vs/dy(Cy+1-2Cy+Cy-1)
c VALOR (Cy+1-2Cy+Cy-1)
  if(indvar.eq.c1) then
    call getyx(c1,gsedim,nydim,nxdim)
  else if(indvar.eq.c4) then
    call getyx(c4,gsedim,nydim,nxdim)
  else if(indvar.eq.c7) then
    call getyx(c7,gsedim,nydim,nxdim)
  else if(indvar.eq.c10) then
    call getyx(c10,gsedim,nydim,nxdim)
  endif
  IF(LG(1)) THEN
  do jx=1,nx
  do jy=1,ny
    gsedim(jy,jx)=gsedim(jy+1,jx)+gsedim(jy,jx)-gsedim(jy-1,jx)
    if (jy.eq.ny) gsedim(jy,jx)=0.
    if (jy.eq.1) gsedim(jy,jx)=gsedim(jy+1,jx)
  end do
  end do
  ELSE
c EN GRC1 GUARDA LO QUE CAE A LA CELDA DE ABAJO Y EN LO CAIRIA DE LA CELDA
c DE ARRIBA
  do jx=1,nx
  do jy=1,ny
    gseval(jy,jx)=gsedim(jy+1,jx)
    if (jy.eq.ny) gseval(jy,jx)=0.
    if (jy.eq.1) gseval(jy,jx)=gsedim(jy,jx)
    grc1(jy,jx)=gseval(jy,jx)-gsedim(jy,jx)
    if (jy.gt.1) then
      iy=float(jy)-1.
      grc2(int(iy),jx)=gsedim(jy,jx)-gseval(jy,jx)
      if(jy.eq.ny) grc2(jy,jx)=0.
    end if
  end do
  end do
c GRC3 CALCULA TRANSPORTE (ENTRADA Y SALIDA) NETO DE CADA CELDA
c GRC5 CALCULA LA CANTIDAD DE SEDIMENTO EN CADA CELDA
do jx=1,nx

```

```

do jy=1,ny
  grc3(jy,jx)=grc1(jy,jx)+grc2(jy,jx)
end do
end do
end if
if (indvar.eq.c1) then
call setyx(c13,grc3,nydim,nxdim)
else if (indvar.eq.c4) then
call setyx(c14,grc3,nydim,nxdim)
else if (indvar.eq.c7) then
call setyx(c15,grc3,nydim,nxdim)
else if (indvar.eq.c10) then
call setyx(c16,grc3,nydim,nxdim)
end if
call setyx(val,gseval,nydim,nxdim)
RETURN
1312 CONTINUE
C----- SECTION 15 ----- value = GRND3
c FUENTE DE SEDIMENTO QUE REGRESA A LA CELDA INFERIOR LO QUE
c QUE QUITA DE LA CELDA SUPERIOR
call getyx(vol,gvol,nydim,nxdim)
if (indvar.eq.c2) then
call getyx(c13,grc3,nydim,nxdim)
call getyx(grsp1,gsedim,nydim,nxdim)
else if (indvar.eq.c5) then
call getyx(c14,grc3,nydim,nxdim)
call getyx(grsp2,gsedim,nydim,nxdim)
else if (indvar.eq.c8) then
call getyx(c15,grc3,nydim,nxdim)
call getyx(grsp3,gsedim,nydim,nxdim)
else if (indvar.eq.c11) then
call getyx(c16,grc3,nydim,nxdim)
call getyx(grsp4,gsedim,nydim,nxdim)
end if
do jx=1,nx
do jy=1,ny
gseval(jy,jx)=gvol(jy,jx)*grc3(jy,jx)*gsedim(jy,jx)
& *1000.0
end do
end do
call setyx(val,gseval,nydim,nxdim)
RETURN
1315 CONTINUE
C * ----- SECTION 6 ---- Finish of iz slab.
c CALCULO DE LA CONCENTRACION TOTAL C18 METODO 2 Y C28 METODO 1
if(isweep.eq.lisweep) then
CALL PRNPT1('STRESS ',PVSTRS,IPNAME('ESFUERZO'),0)
call fn10(c19,c3,c1,0.0,-1.,1.)
call fn10(c20,c6,c4,0.0,-1.,1.)
call fn10(c21,c9,c7,0.0,-1.,1.)
call fn10(c22,c12,c10,0.0,-1.,1.)
call fn10(c23,c19,c2,0.0,1.0,1.0)
call fn10(c24,c20,c5,0.0,1.0,1.0)
call fn10(c25,c21,c8,0.0,1.0,1.0)

```

```
call fn10(c26,c22,c11,0.0,1.0,1.0)
call fn14(c18,c23,c24,c25,c26,c17,0.0,1.,1.,1.,0.)
call fn14(c27,c2,c5,c8,c11,c17,0.0,1.,1.,1.,0.)
call fn14(c28,c1,c4,c7,c10,c17,0.0,1.,1.,1.,0.)
end if
return
```

C.....