

XX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE ALGUNOS DE LOS PARÁMETROS DE CÁLCULO DE LA EVOLUCIÓN MORFOLÓGICA DE RÍOS DE MONTAÑA

Pablo Spalletti, José Daniel Brea y Marcela Busquets

Instituto Nacional del Agua, Laboratorio de Hidráulica, Ezeiza, Buenos Aires, Argentina
E-mail: pspallett@ina.gov.ar

RESUMEN

En el presente trabajo se describe el modelo matemático unidimensional desarrollado en el Laboratorio de Hidráulica, que resuelve la hidrodinámica y la evolución de los procesos morfológicos de los cauces de ríos de montaña, cuyo fondo no puede considerarse de granulometría uniforme, debiéndose trabajar con formulaciones que permiten evaluar el comportamiento de lechos con sedimentos heterogéneos. Se presenta la metodología utilizada en su elaboración y se detallan las hipótesis básicas consideradas que permiten expresar el fenómeno mediante expresiones matemáticas sencillas. Para evaluar la sensibilidad de algunos de los parámetros que intervienen en las ecuaciones básicas (espesor de la capa de mezcla y exponente del coeficiente de protección-exposición), se realizaron series de corridas del modelo modificando los valores de los parámetros dentro de intervalos de variación posibles, y se compararon los resultados con los obtenidos en un ensayo en modelo físico a fondo móvil.

ABSTRACT

In this work a hydrodynamic and morphological model for one-dimensional flows in mountain rivers, developed in the Laboratorio de Hidráulica is presented. In mountain rivers the bed has a non uniform distribution, and the equations used to solve the sediment transport and movement in the bed must be able to compute fractional transport rates. The methodology and basic hypothesis to describe the processes with simple mathematical formulations are presented, too. To test the sensitivity to some parameters in the basic equations (active layer width and exponent in the hiding-exposure coefficient), a series of numerical simulations were carried out with variable values of the parameters. The results were compared with the ones obtained in laboratory experiments.

INTRODUCCIÓN

Los ríos de montaña se caracterizan por presentar lechos con sedimentos heterogéneos, como consecuencia por un lado de la variabilidad en los fenómenos que actúan como aportes de material que pueden ocurrir en zonas montañosas, tales como deslizamientos de laderas, coladas de detritos, erosión superficial; y por otro a los procesos de erosión y depósito que ocurren en el cauce, y que están vinculados al transporte de los sedimentos que componen el lecho.

Los sedimentos son transportados por la acción del flujo, en forma de arrastre en el fondo en una capa de cierto espesor, en suspensión formando parte de la corriente, y como carga de lavado. En esta última el tamaño de sus partículas es extremadamente fino y no se encuentra dentro de los elementos presentes en el lecho, razón por lo que se considera que no interactúa con el fondo, haciéndose irrelevante en el cálculo de la erosión o depósito en este tipo de ríos.

Para modelar la dinámica morfológica de este tipo de ríos deben tenerse en cuenta una serie de fenómenos relacionados con el transporte de la mezcla de sedimentos del lecho, como ser entre otros la mayor movilidad intrínseca de las partículas finas que hace que los sedimentos del lecho sea más gruesos en relación a la composición del material transportado, el efecto de protección-exposición que incrementa la movilidad de las partículas más gruesas y disminuye la de las más finas en comparación con las de los correspondientes a material uniforme y reduciendo la diferencia entre la composición del lecho y del material transportado y el efecto de acorazamiento dinámico del fondo que produce una protección vertical contra la erosión (12).

En general, las ecuaciones desarrolladas para calcular el transporte de sedimentos en ríos no tienen en cuenta el efecto de la no-uniformidad del material, además de haber sido verificadas en rangos limitados respecto de las condiciones hidráulicas y sedimentológicas. Sin embargo, introduciendo el concepto de la capa de mezcla y a partir de los resultados de investigaciones recientes, algunas de las formulaciones han sido adaptadas para estudiar la evolución morfológica de ríos con sedimentos heterogéneos, mediante la aplicación de algunas de las ecuaciones de transporte a cada clase granulométrica y la incorporación de un término que tiene en cuenta el efecto de protección-exposición (2, 3).

Con el fin de estudiar este tipo de problemas, se desarrolló un programa para estudiar la evolución de los procesos morfológicos, acoplado a un modelo hidrodinámico. El presente trabajo contiene la metodología utilizada en su elaboración, así como las hipótesis básicas consideradas. Finalmente, para un caso testigo, se analizó la sensibilidad del espesor de la capa de mezcla y del efecto de protección-exposición, comparándose los resultados con los obtenidos en un modelo físico.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El módulo hidrodinámico se basa en las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento, considerando válidas las hipótesis de St Venant. En su forma diferencial, con $y(x,t)$ y $Q(x,t)$ como variables dependientes, las ecuaciones anteriores pueden escribirse como:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{b} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad [1]$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \cdot A \cdot \frac{\partial y}{\partial x} + g \cdot A \cdot \frac{Q \cdot |Q|}{K^2} = 0 \quad [2]$$

con $b=b(y)$, $A=A(y)$

donde:

y: altura de la superficie libre

b: ancho superficial

Q: caudal

t: tiempo

x: distancia longitudinal horizontal

A: área de la sección

g: aceleración de la gravedad

$$K^2 = \frac{A^{5/3}}{n \cdot \chi^{2/3}} \quad [3]$$

n: número de Manning

χ : perímetro mojado

Estas ecuaciones permiten resolver los escurrimientos impermanentes gradualmente variados, si las variables dependientes son funciones continuas y diferenciables. El sistema fue resuelto por el método de diferencias finitas, utilizando el esquema de Preissmann (1, 9, 13, 14).

Para la continuidad de la fase sólida se ha implementado un modelo en dos estratos (5, 8, 10, 11, 12). Si bien los sedimentos se mueven continuamente de una capa a la otra, su comportamiento en cada capa es marcadamente diferente.

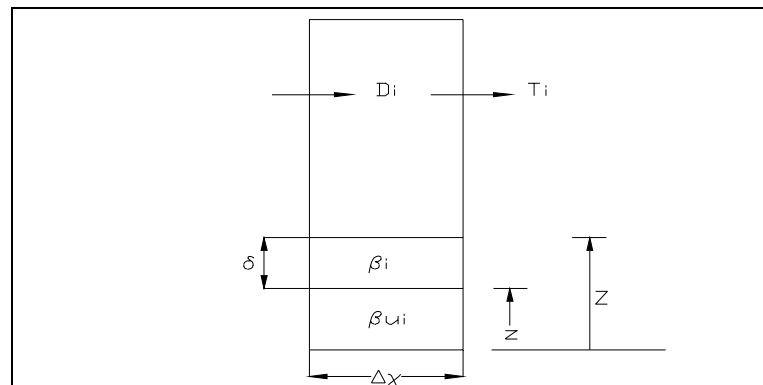


Figura 1- Esquema de transporte según estratos.

Se define una capa superior de transporte total, en la que se desarrolla el transporte en suspensión y de fondo, donde prevalece el movimiento longitudinal, debido a la velocidad del escurrimiento en la dirección de la corriente, sobre el vertical, dado por las fluctuaciones de la turbulencia y por la velocidad de caída de las partículas. Debajo del anterior, se define un estrato activo, o de mezcla, de espesor δ y composición granulométrica β_i , donde la partícula no está en movimiento horizontal sino que está sujeta a movimiento vertical, desde y hacia el estrato de transporte total. Se supone que la totalidad de las partículas de determinado tamaño de clase en el interior del estrato activo, están propensas a moverse independientemente de su localización (16).

Para la fracción granulométrica i -ésima la ecuación de continuidad del sedimento en el estrato de transporte puede expresarse como:

$$B \cdot D_i + \frac{\partial T_i}{\partial x} = 0 \quad [4]$$

T_i : transporte de la clase i -ésima [volumen / tiempo]
 D_i : flujo neto vertical de la clase i -ésima
 B : ancho

La ecuación de conservación de masa para sedimentos uniformes se puede escribir como:

$$(1 - p) \cdot B \cdot \frac{\partial Z}{\partial t} = - \frac{\partial T}{\partial x} \quad [5]$$

p : porosidad del sedimento
 Z : cota del fondo
 T : transporte volumétrico total

Combinando [4] y [5]:

$$(1 - p) \cdot \frac{\partial Z}{\partial t} = \sum D_i \quad [6]$$

$$(1 - p) \cdot \frac{\partial (z + \delta)}{\partial t} = \sum D_i \quad [7]$$

Si se aplica la ecuación de conservación de masa para una clase granulométrica al espesor de mezcla (asumiendo que todas las partículas tienen la misma densidad), como una generalización de la ecuación [5], se tiene:

$$(1 - p) \cdot B \cdot \left[\frac{\partial (\beta_i \cdot \delta)}{\partial t} + \beta_i^* \cdot \frac{\partial (Z - \delta)}{\partial t} \right] = - \frac{\partial T_i}{\partial x} \quad [8]$$

donde:

$$\begin{aligned} \beta_i^* &= \beta_i & \text{si } \sum D_i > 0 \text{ (depósito)} \\ \beta_i^* &= \beta_{ui} & \text{si } \sum D_i < 0 \text{ (erosión)} \end{aligned}$$

Con la ecuación [5] se evalúa la evolución temporal de la cota de fondo, mientras que con la [8] se hace lo propio con la composición granulométrica del estrato de mezcla (4, 6, 7, 12, 16).

Para el cálculo del transporte por clases, se utilizó la ecuación de Di Silvio (2, 10, 11, 12). Esta ecuación fue originalmente obtenida para sedimentos uniformes, siendo verificada mediante datos de campo, para ser luego adaptada para su utilización con materiales heterogéneos, introduciendo el término β_i referido a la i -ésima clase granulométrica y un coeficiente de protección-exposición. Di Silvio presenta para sedimentos heterogéneos, la siguiente expresión:

$$T_i = \alpha \cdot \frac{I^n \cdot Q^m}{B^p \cdot d_i^q} \cdot \beta_i \cdot r_i \quad [9]$$

donde:

I : pendiente longitudinal
 d_i : diámetro representativo de cada fracción granulométrica

De acuerdo al autor, los coeficientes pueden adoptar los siguientes valores: $m=1.8$, $n=2.1$, $p=0.8$, $q=1.2$ y $\alpha=0.08$.

El término r_i es el coeficiente de corrección que tiene en cuenta el efecto de protección-exposición y puede expresarse como:

$$r_i = \left(\frac{d_i}{\sum \beta_i \cdot d_i} \right)^s \quad [10]$$

Los valores del exponente “s” pueden variar entre 0 y 1, siendo estos valores límites del intervalo los correspondientes a comportamientos extremos del transporte. Si el exponente es igual a 0 no existen efectos de protección-exposición y el transporte es completamente selectivo, mientras que si dicho valor es 1 los efectos son tan importantes que se anula el efecto de la movilidad intrínseca de las partículas, conduciendo a una condición de igual movilidad.

En relación al espesor de la capa de mezcla, algunos autores la calculan en función de la profundidad del flujo líquido mediante $\delta = \alpha \cdot h$ con $\alpha = 0.15$. Otros lo hacen en función de las características granulométricas del material del lecho con $\delta = 2 \cdot d_{90}$ (2, 12) ó $\delta = d_{\text{máx}}$ (6). Por otro lado, los cambios en el comportamiento del lecho frente a la erosión y la sedimentación hace que la definición del estrato activo y su espesor sean diferentes en ambos casos (16).

El programa de cálculo es flexible respecto de la definición de estos parámetros, pudiendo seleccionarse cualquiera de las alternativas antes indicadas.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL COEFICIENTE DE PROTECCIÓN-EXPOSICIÓN (PARÁMETRO “s”) Y DEL ESPESOR DE LA CAPA DE MEZCLA (“δ”).

Los datos hidráulicos, morfológicos y sedimentológicos necesarios para la implementación del modelo son las secciones transversales del curso de agua definidas de forma tal de definir el perfil longitudinal, la composición granulométrica del fondo y las condiciones de contorno con su variabilidad temporal (caudales líquidos y sólidos ingresantes y niveles en la restitución). El modelo evalúa en el tiempo, parámetros tales como los volúmenes y la composición granulométrica del material transportado y de fondo, caudales líquidos, niveles, anchos superficiales, alturas líquidas, etc., en cada una de las secciones de cálculo.

Se ha verificado el funcionamiento del modelo matemático, con los resultados de un modelo físico a fondo móvil en escala 1:25 realizado en el LHA, correspondiente al cauce del río Medina aguas abajo del Dique Villa Lola (Provincia de Tucumán, Argentina). (15).

La granulometría de los sedimentos en el lecho del río Medina y en el modelo físico se presentan en la Tabla 1.

Diám. Río (m.)	Diám. modelo (m.)	porcentaje %
0.019375	0.000775	1
0.027250	0.001090	3
0.038500	0.001540	11
0.054500	0.002180	17
0.077125	0.003090	21
0.109125	0.004370	9
0.217750	0.008710	38

Tabla 1- Composición granulométrica del lecho del río Medina y del modelo físico.

El canal de ensayo tiene 2,5 metros de ancho, y se modeló un tramo a fondo móvil de 15 metros de largo, con una pendiente longitudinal de 0,02 y un caudal de crecida de 120 litros/s. No se consideró recirculación de sedimentos, correspondiendo con el caso típico del corte de aportes generado por la presencia de una presa. Durante el ensayo, para las condiciones indicadas, se observa que en los primeros 30 minutos se presentan fuertes procesos erosivos y cambios en la composición granulométrica del lecho. A continuación se tiene que la pendiente longitudinal tiende a suavizarse en forma gradual, sin observarse cambios de importancia en las distribuciones granulométricas del material del fondo. La duración total del ensayo fue de 5 horas, situación para la que se obtuvieron muestras de los 2 centímetros superiores del lecho, y que corresponde aproximadamente con el espesor de la capa de mezcla ($2 \cdot d_{90} \cong 1.5$ centímetros). En la Figura 2 se presentan los cambios experimentados por el lecho en una sección característica.

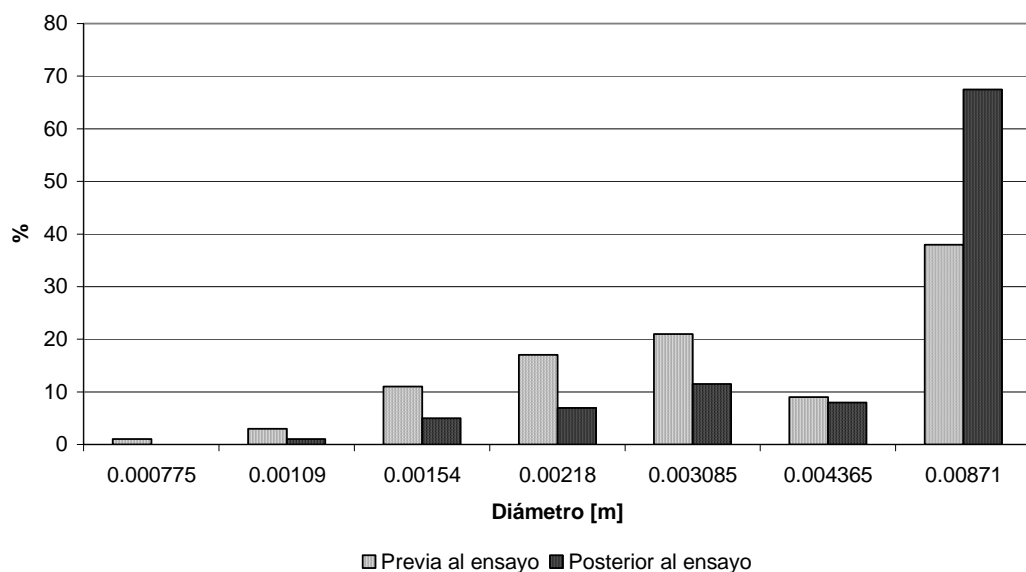


Figura 2- Comparación de la composición granulométrica del lecho en el modelo físico.

Para evaluar el comportamiento mediante el programa de cálculo y realizar el análisis de sensibilidad de los parámetros propuestos, se trabajó con los mismos datos que los correspondientes al modelo físico, imponiéndose las mismas condiciones de contorno.

Con el fin de evaluar la influencia del parámetro "s" (exponente en la expresión del coeficiente de protección-exposición) en la predicción de la evolución morfológica, se llevó a cabo una serie de corridas en el modelo, con valores del parámetro comprendidos en todo su rango de variación, manteniendo en todos los casos las mismas condiciones de modelación en relación al resto de los parámetros. Para este grupo de ensayos se consideró un espesor de la capa activa o de mezcla igual a $2 \cdot d_{90}$. En la Figura 3 se muestran las composiciones granulométricas de equilibrio en cada uno de los casos analizados y se comparan con los resultados del modelo físico para una sección característica.

Se aprecia una gran concordancia de los resultados de la modelación numérica respecto de los resultados del modelo físico para un valor de $s=0.2$. Por otro lado, se observa que el fuerte grado de influencia de este parámetro en la predicción de los fenómenos morfológicos. En la bibliografía (2, 12), no se aprecia una tendencia hacia la selección de un determinado valor del exponente, sino que se encuentran valores comprendidos en todo el intervalo de variación. En particular Di Silvio (12), a partir de experiencias en modelo obtiene que el valor del parámetro "s" en su fórmula entre 0.2 y 0.4.

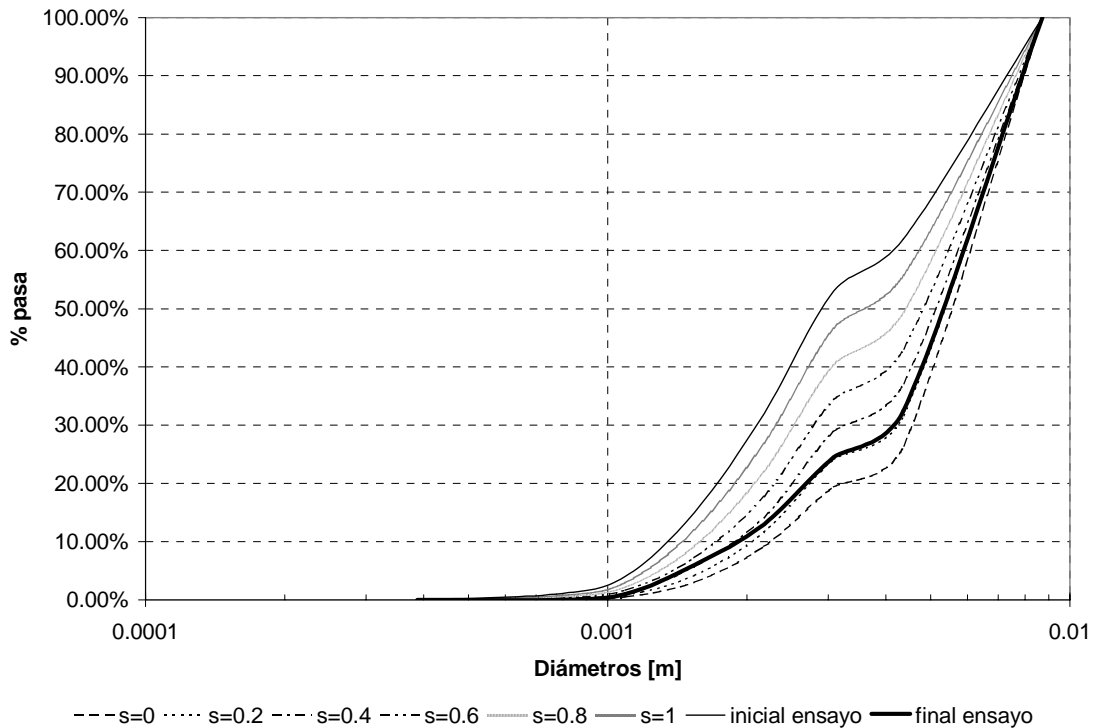


Figura 3- Composición granulométrica al final del período analizado, en correspondencia con la sección de progresiva 5 metros.

Como se indicara antes, si el exponente es 0 no existen efectos de protección-exposición y un incremento del transporte global, mientras que si su valor es 1 se anula el efecto de la movilidad intrínseca de las partículas y el transporte global se reduce. Esto puede apreciarse en la Figura 4, donde se presenta la evolución en el tiempo de la cota de fondo en correspondencia con la sección localizada en la progresiva 5 metros.

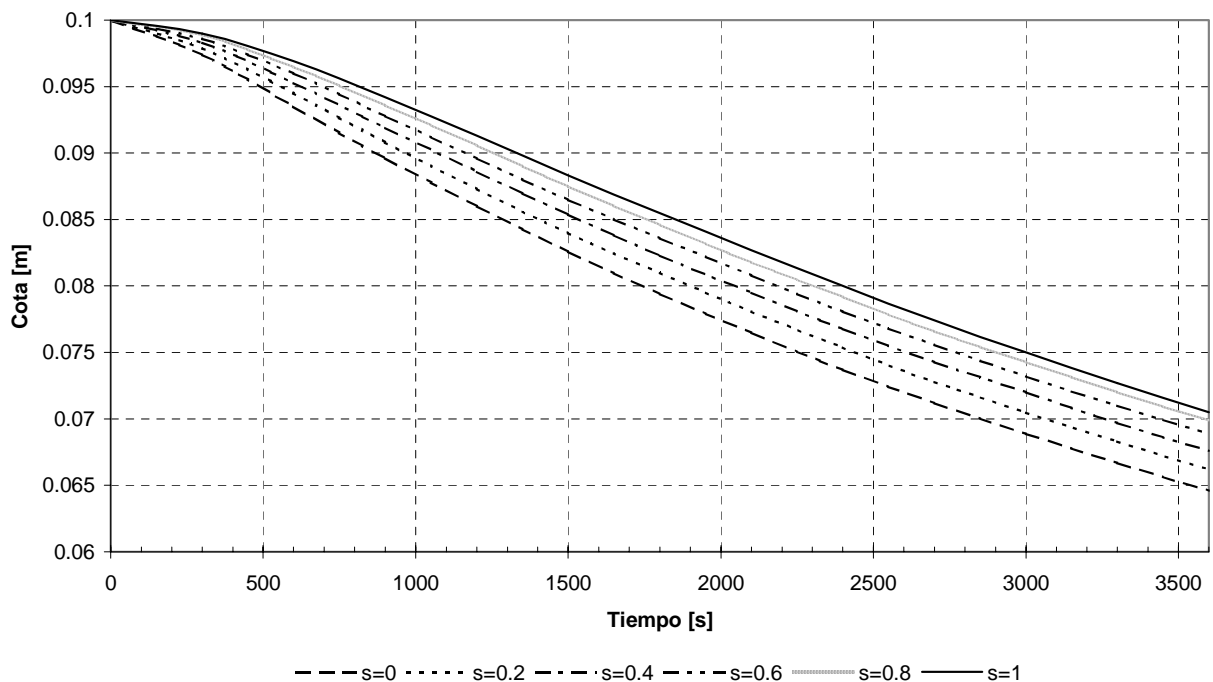


Figura 4- Evolución de la cota de fondo en correspondencia con la sección de progresiva 5 metros.

Para evaluar la influencia del espesor del estrato de mezcla en la predicción de la evolución morfológica del cauce, se consideraron en el cálculo distintos valores del

espesor δ , manteniendo el resto de las condiciones de ensayo, considerando para el exponente del coeficiente de protección-exposición un valor de 0.2. Se consideraron valores del espesor variables en el tiempo en función de la evolución de la composición granulométrica del lecho, realizándose corridas del modelo para $0.5.d_{90}$, $1.d_{90}$, $2.d_{90}$, $3.d_{90}$ y $4.d_{90}$.

En la Figura 5 se indica la evolución temporal de la fracción más gruesa del material de fondo, para la sección ubicada en la progresiva 5 metros. A partir de los resultados presentados en dicha figura, se observa que a medida que se consideran menores espesores del estrato de mezcla, se aceleran los procesos de cambio en la composición granulométrica del sedimento. También se aprecia que independientemente del espesor de la capa activa, la distribución porcentual de los distintos tamaños de partícula tiende asintóticamente a un mismo valor.

Esto está de acuerdo con lo presentado por distintos investigadores (5, 8, 12) en relación a las expresiones para calcular la celeridad del cambio para las fracciones granulométricas, donde el espesor δ es inversamente proporcional a la celeridad. Suponiendo que la totalidad de las partículas de determinado tamaño de clase en el interior del estrato activo pueden ser puestas en movimiento, al considerar capas de mayor espesor, en el balance de material en el volumen de control, cada fracción dispone de mayor cantidad de partículas para compensar los cambios que imponen los procesos erosivos o de sedimentación, por lo que proporcionalmente los cambios en la composición granulométrica son más lentos.

Para menores espesores, esta mayor velocidad de aumento de los porcentajes de las partículas de mayor tamaño, tiene como efecto directo tasas de descenso del lecho más bajas, como puede apreciarse en la Figura 6.

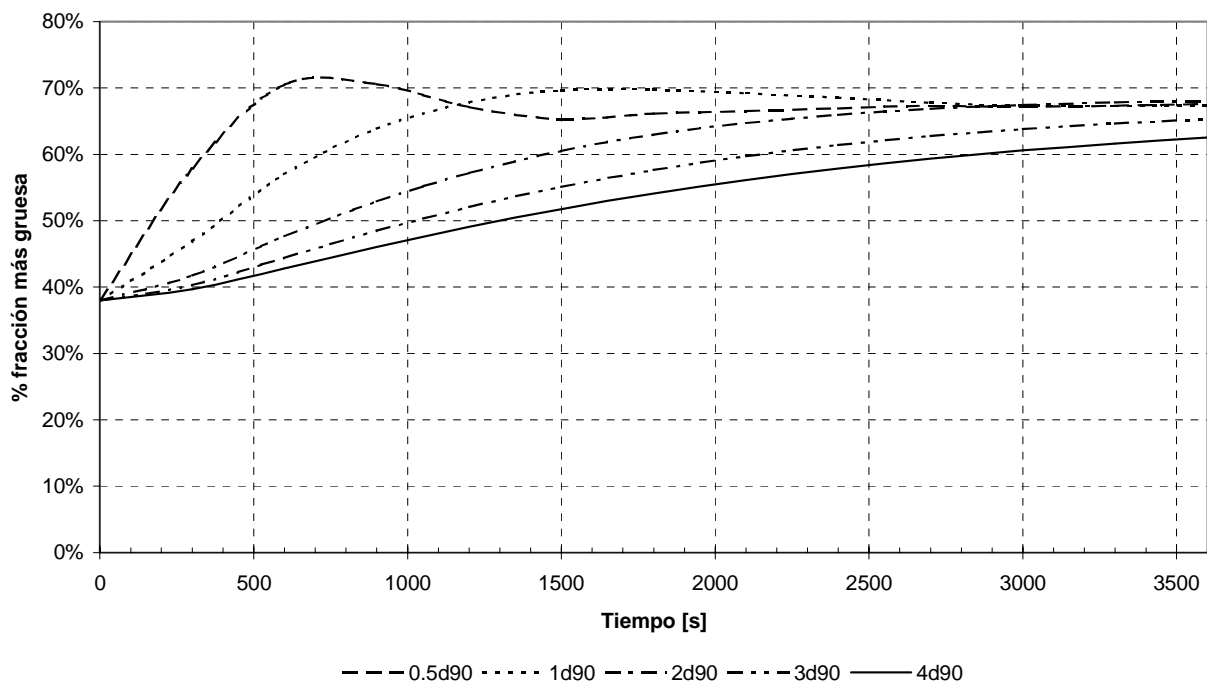


Figura 5- Evolución temporal de la fracción más gruesa de la composición granulométrica en la sección de progresiva 5 metros.

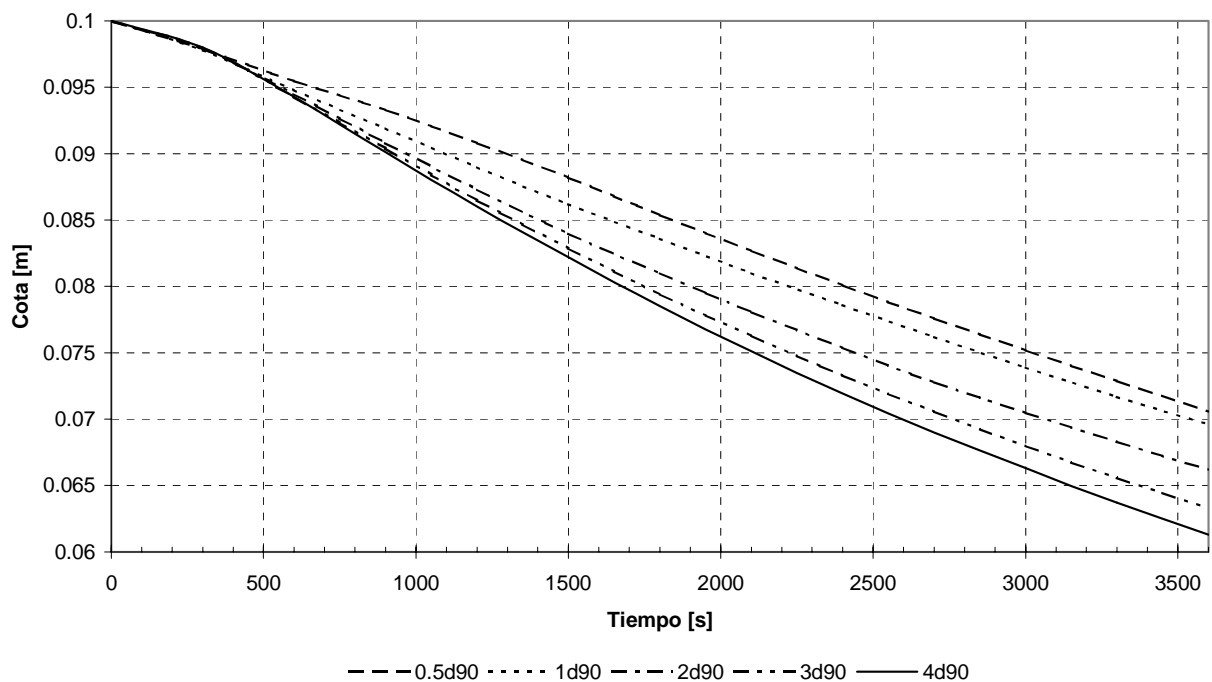


Figura 6- Evolución de la cota de fondo en correspondencia con la sección de progresiva 5 metros.

CONCLUSIONES

Se presenta el modelo desarrollado en el Laboratorio de Hidráulica, para resolver la hidrodinámica y la evolución morfológica de ríos de montaña, cuyos lechos se caracterizan por poseer materiales heterogéneos. El comportamiento de los sedimentos es fuertemente dependiente de algunos de los parámetros que intervienen en las fórmulas de cálculo, siendo la calibración del modelo un paso ineludible si quieren obtenerse resultados confiables.

En particular el exponente del coeficiente de protección-exposición es un parámetro básico para realizar la calibración de este tipo de modelos morfológicos. De acuerdo a los resultados obtenidos a partir del programa y de su comparación con lo observado y medido en modelo físico, se tiene para un valor de $s=0.2$ los resultados son concordantes.

Respecto del espesor de la capa de mezcla, en el modelo físico se observó que la composición granulométrica alcanzó su valor de equilibrio a los 30 minutos de avanzado el ensayo, situación que se corresponde con la observada en el modelo matemático cuando el espesor del estrato activo se considera del orden de $2.d_{90}$. Esto es coincidente con los valores que autores como Di Silvio proponen para este parámetro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Abbott, M. (1979). "Computational hydraulics. Elements of the theory of free surface flows".
- (2) Basile, P., (2000). "Revisión de ecuaciones de transporte modificadas para sedimentos heterogéneos". XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica – Córdoba 2000. Argentina.
- (3) Basile, P., (2000). "Transporte sólido en ríos con lechos de sedimentos heterogéneos". Congreso Nacional del Agua. Río Hondo. Santiago del Estero. Argentina.

- (4) Basile, P., (1999). "Modelación de procesos de erosión-sedimentación en ríos con lechos de sedimentos heterogéneos". Cuadernos del CURIHAM. Argentina.
- (5) Basile, P., (1994). "Modellazione dei meccanismi di intercettazione e rilascio de sedimenti da parte delle briglie permeabili". Dottorato di ricerca in idrodinamica. Padova. Italia.
- (6) Belleudy, Ph., (2000). "Numerical simulation of sediment mixture deposition. Part 1: análisis of a flume experiment." Journal of Hydraulic Research, Vol. 38, 2000, No. 6.
- (7) Belleudy, Ph., (2001). "Numerical simulation of sediment mixture deposition. Part 2: a sensitivity analysis." Journal of Hydraulic Research, Vol. 39, 2001, No. 1.
- (8) Busquets, M., Brea, J.D., Peviani, M.(2000). "Evolución morfológica de ríos de montaña". Congreso Nacional del Agua. Río Hondo. Santiago del Estero. Argentina.
- (9) Cunge, J., Holly, F., Verwey, a., (1980). "Practical Aspects of Computational River Hydraulics".
- (10) Di Silvio, G., Peviani, M., (1989). "Modelling short and long term evolution of mountain rivers: an application to the Torrent Mallero (Italy)." Italy.
- (11) Di Silvio, G., Peviani, M., (1990). "Long term evolution of mountain rivers" Italy.
- (12) Di Silvio, G., Peviani, M., (1991). "Transport of a mixture of sand and gravel in suspension and as bedload: experiments and mathematical modelling." Symposium on "The transport of suspended sediments and its mathematical modelling", Florence. Italy.
- (13) Kutija, V., Hewett, C., (2002). "Modelling of supercritical flow conditions revisited; NewC Scheme." Journal of Hydraulic Research, Vol. 40, 2002, No. 2.
- (14) Liggett, J., Cunge, J., "Unsteady flow in open channels". Volume 1.
- (15) Loschacoff, C., Brea, J.D., (1999). "Estudio de protección del mineroducto en el río Medina (Tucumán)." Informe LHA – INA. Ezeiza. Argentina.
- (16) Rivera, F., Berezowsky, M., Soto, G.(2000). "Determinación del cambio granulométrico asociado al movimiento del fondo en ríos". XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica – Córdoba 2000. Argentina.