

# MODELO DE SEDIMENTACIÓN EN EMBALSES: DELTAS Y CORRIENTES DE TURBIDEZ

Javier González S<sup>1</sup>, Aldo Tamburrino T.<sup>2</sup>, y Yarko Niño C<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Magíster en Recursos y Medio Ambiente Hídrico, Universidad de Chile, javgonza@ing.uchile.cl, Santiago Chile.

<sup>2</sup>Profesor Asociado, Universidad de Chile, atamburr@ing.uchile.cl, Santiago, Chile.

<sup>3</sup>Profesor Asociado, Universidad de Chile, ynino@ing.uchile.cl, Santiago, Chile.

## Introducción

La construcción de un embalse representa una alteración en el equilibrio natural del transporte de sedimentos de un cauce fluvial. Las bajas velocidades que desarrolla el flujo influenciado por el muro de contención, favorecen la depositación de las partículas de sedimento y la consecuente acumulación al interior del embalse. En el largo plazo, la principal consecuencia de la acumulación de sedimentos en un embalse corresponde a la pérdida de su capacidad de almacenamiento. Reemplazar esta pérdida mediante la construcción de nuevos embalses, es una alternativa cada día más difícil de ejecutar debido a las nuevas restricciones que surgen de los intereses ecológicos, políticos y económicos de la sociedad actual. De este modo es necesario un manejo planificado de los sedimentos, basado en la comprensión de los procesos hidrodinámicos involucrados, y apoyado por herramientas de modelación que permitan una adecuada predicción y cuantificación de ellos.

En general, el sedimento transportado por un cauce puede clasificarse en dos grandes grupos, gruesos y finos. Aunque en la mayoría de estos cauces el lecho está formado por sedimentos gruesos, la mayor parte del gasto sólido anual está representada por los sedimentos finos (Kostic y Parker, 2003). Los sedimentos finos son transportados en suspensión, su depositación es inhibida por la alta turbulencia que desarrollan los cauces naturales, mientras que los sedimentos gruesos son transportados como arrastre de fondo. Al entrar al embalse las velocidades del flujo disminuyen, perdiendo capacidad de arrastre. Como consecuencia, las partículas más gruesas se depositan para formar lo que se conoce como un delta. Estos depósitos presentan dos zonas distintivas, una zona de pendiente baja correspondiente a la elevación del lecho del cauce y un frente abrupto que avanza hacia aguas profundas mediante avalanchas de sedimento grueso. Por otro lado, si la carga de sedimentos finos transportados en suspensión es suficiente para hacer al afluente más denso que el agua del embalse, éste se sumerge sobre el frente del delta formando una corriente de turbidez que puede recorrer grandes distancias depositando los sedimentos finos en el fondo del embalse.

## Objetivos

Hasta la fecha, los modelos de sedimentación en embalses que se han desarrollado y que incorporan la formación de corrientes de turbidez en conjunto con la evolución de los gruesos, consideran una sección de escurrimiento rectangular y uniforme bajo un régimen de flujo uniforme y subcrítico en toda la extensión del cauce, así como el desarrollo de corrientes de turbidez sin influencia desde aguas abajo (Parker, 1986; Kostic y Parker, 2003).

La aplicación práctica de estos modelos a la mayoría de los embalses se dificulta dado que es común encontrar cauces con perfiles topográficos altamente variables, que no son bien representados mediante la utilización de secciones uniformes, y en los cuales los fenómenos de crecidas son capaces de movilizar grandes cantidades de sedimentos. Además, es necesario incluir el

condicionamiento que ejerce el muro del embalse sobre la corriente de turbidez.

El objetivo de este trabajo consiste en la elaboración de un modelo que permita reproducir la depositación y evolución conjunta de sedimentos gruesos y finos en un embalse, incorporando el efecto de una topografía variable en el régimen de flujo, el cual puede ser subcrítico o supercrítico o una combinación de ellos dependiendo de la pendiente del cauce, así como también el desarrollo de una corriente de turbidez influenciada por la presencia del muro del embalse.

## Formulación Teórica

El escurrimiento unidimensional e impermanente en un cauce natural con topografía variable puede ser descrito mediante las ecuaciones de Saint-Venant. La forma conservativa de estas ecuaciones corresponde a,

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} = -gA \frac{\partial Z}{\partial x} - gS_f \quad (2)$$

$$S_f = \frac{n^2 Q |Q|}{R_h^{4/3} A} \quad (3)$$

Donde  $A$  representa la sección de escurrimiento,  $Q$  el caudal,  $x$  es la coordenada longitudinal,  $t$  es el tiempo,  $g$  es la aceleración de gravedad,  $Z$  el nivel de la superficie libre,  $n$  el coeficiente de rugosidad de Manning,  $S_f$  es la pendiente de la línea de energía y  $R_h$  el radio hidráulico de la sección de escurrimiento.

Las secciones transversales del cauce se aproximan a una forma trapecial con taludes  $H:V k_r$  y  $k_d$ , y un ancho basal  $b_w$ , todas variables en la dirección longitudinal.

La evolución del sedimento grueso se describe mediante una modificación de la ecuación de Exner que busca reproducir una depositación en una sección transversal no rectangular.

$$\frac{\partial A_s}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda_g} \frac{\partial Q_s}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

Donde  $A_s$  es el área de sedimento depositado,  $Q_s$  es el gasto sólido total de fondo y  $\lambda_g$  es la porosidad del depósito de sedimento grueso. Para evaluar el gasto sólido total de fondo se utiliza, por ejemplo, la relación de Meyer-Peter y Müller y se supone que éste se moviliza por el fondo de la sección sin afectar a los taludes.

$$Q_s = 8b_w \sqrt{Rgd_s^3} (\tau_* - 0.047)^{3/2} \quad (5)$$

Donde  $R$  es la relación específica de densidades, con un valor aproximado de 1,65 para sedimentos naturales,  $d_s$  es el diámetro de las partículas de sedimento grueso y  $\tau_*$  representa el esfuerzo de corte adimensional actuando sobre el fondo dado por

$$\tau_* = \frac{R_h S_f}{R d_s} \quad (6)$$

Otras relaciones de gasto sólido, tales como Parker (1990), Ackers y White (1973), Wilcock y Crowe (2003), entre otras, son también utilizadas en el modelo como alternativas disponibles para el usuario.

El flujo unidimensional de una corriente de turbidez que experimenta cambios de régimen puede representarse por las siguientes ecuaciones (Toniolo, 2002),

$$\frac{\partial h_c}{\partial t} + \frac{\partial U_c h_c}{\partial x} = (1 - \delta) e_w U_c - \delta v_s \quad (7)$$

$$\frac{\partial Ch_c}{\partial t} + \frac{\partial U_c Ch_c}{\partial x} = -v_s C \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_c h_c}{\partial t} + \frac{\partial U_c^2 h_c}{\partial x} + \delta U_c v_s = \\ -\frac{1}{2} Rg \frac{\partial Ch_c^2}{\partial x} - Rg S Ch_c - C_f U_c^2 \end{aligned} \quad (9)$$

Donde  $h_c$  es la altura de la corriente de turbidez,  $U_c$  la velocidad longitudinal media integrada en la vertical,  $C$  es la concentración volumétrica integrada en la vertical,  $v_s$  es la velocidad de sedimentación de las partículas finas en un cuerpo de agua en reposo,  $C_f$  es un coeficiente de fricción,  $S$  es la pendiente longitudinal del fondo y  $\delta$  es un parámetro que toma un valor unitario en régimen subcrítico y cero en régimen supercrítico. Finalmente  $e_w$  es el coeficiente de incorporación de agua a través de la interfaz, el cual depende del número de Richardson,  $Ri$ , y está determinado por la expresión (Parker, 1986):

$$e_w = \frac{0.00153}{0.0204 + Ri} \quad (10)$$

$$Ri = \frac{g R h_c C}{U_c^2} \quad (11)$$

En las ecuaciones anteriores se ha considerado que la corriente de turbidez tiene un carácter puramente depositativo. Los cambios topográficos no tienen efecto en el espesor de los depósitos de una corriente de turbidez a menos que constituyan un control hidráulico y sean capaces de reflejar la corriente hacia aguas arriba (Bursik y Woods, 2000). De este modo la ecuación de evolución del lecho se escribe como:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{v_s C}{1 - \lambda_f} \quad (12)$$

Donde  $\eta$  es la elevación del lecho y  $\lambda_f$  la porosidad del depósito de sedimento fino.

## Resultados y Conclusiones

El modelo de flujo descrito anteriormente se resuelve mediante un esquema numérico de volúmenes finitos, tipo upwind, que utiliza una ponderación del gradiente de superficie libre basada en la celeridad del flujo (Ying, 2004). Por su parte el modelo de corriente de turbidez se resuelve utilizando un esquema de diferencias finitas, tipo MacCormack (Toniolo, 2002). Ambos esquemas son capaces de capturar frentes de choque, de modo que cualquier resalto hidráulico (tanto en el flujo con superficie libre de aproximación como en la corriente de turbidez) es automáticamente determinado.

El modelo se aplicó a un embalse tipo, de 10 Km. de

longitud, con una elevación de la superficie de agua en el muro de 70 m y un caudal afluente constante igual a 18 m<sup>3</sup>/s. Las secciones transversales poseen un ancho basal variable entre 18 y 24 m, y los taludes varían entre 1 y 2 H:V. El perfil longitudinal del fondo posee una pendiente de 1 %, el diámetro característico del sedimento grueso es de 40 mm. y la concentración de sedimento fino en suspensión en el cauce afluente se supone constante e igual al 5%. Los resultados al cabo de un año de modelación se muestran en la Figura 1 y Figura 2.

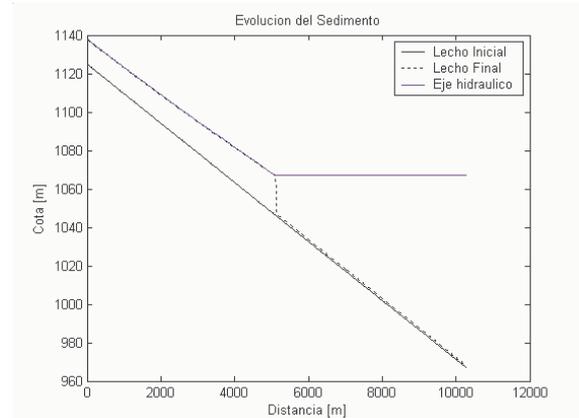


Figura 1.- Aplicación del Modelo. Resultados al cabo de un año de modelación

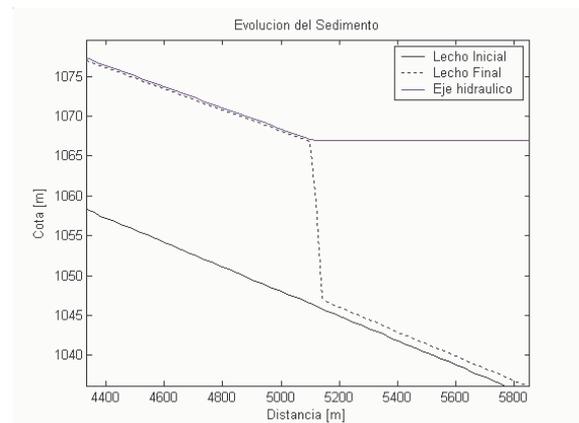


Figura 2.- Acercamiento a la zona del delta.

## Referencias Bibliográficas

- Bursik, M.I., and Woods, A.W., (2000) "The Effects of Topography on Sedimentation from Particle-Laden Turbulent Density Currents" *Journal of Sedimentary Research*, Vol. 70, No. 1, pp. 53-63.
- Parker, G., Fukushima, Y. and Pantin, H. M. (1986): "Self-Accelerating Turbidity Currents", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 171, pp. 125-136.
- Kostic, S., and Parker, G. (2003) "Progradational Sand-Mud Deltas in Lakes and Reservoirs. Part 1. Theory and Numerical Modelling" *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 41, No. 2, pp127-140.
- Toniolo, H., Parker, G., and Voller, V. (Enviado) "Role of ponded turbidity currents in reservoir trap efficiency: formulation". ASCE. *Journal of Hydraulic Engineering*,
- Toniolo, H., Lamb, M., and Parker, G., (Enviado) "Depositional turbidity currents in diapiric minibasins on the continental slope: formulation and theory" *Journal of Sedimentary Research*.
- Ying, X., Khan, A. A., Wang, S. (2004) "Upwind Conservative Scheme for the Saint Venant Equations" ASCE. *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 130, No. 10, pp. 977-987.