

EVALUACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN RÍOS DE PENDIENTE FUERTE ALTAMENTE ACORAZADOS

Mauricio Romero, Vladimir Claros y Viviana Maldonado

Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Mayor de San Simón (LHUMSS)

Avenida Petrolera Km 4.2, Cochabamba, Bolivia, Tel/Fax: +591-4-412 7370

E-mail: mromero@abirh.org - Web: <http://www.lh.umss.edu.bo/>

Introducción

La hidráulica de ríos de alta montaña con pendiente fuerte es uno de los temas más complejos en la ingeniería fluvial, donde la evaluación de procesos de transporte de sedimentos sigue siendo un tópico que requiere de investigación básica y aplicada. Actualmente, existe un número considerable de fórmulas empíricas de transporte en sus diferentes mecanismos, las mismas que han sido desarrolladas mayormente para ríos de pendiente suave con tamaños de partículas de sedimentos en el rango comprendido entre arena fina y grava gruesa.

Dichos modelos empíricos han sido aplicados por diversos autores como Bagnold (1980), Bathurst et al (1987) y Romero & Fernández (2007) entre otros, para la estimación del transporte de sedimentos en ríos de pendiente fuerte y lechos compuestos de diferentes tamaños de partículas.

Como una situación adicional, se tiene que ríos torrenciales con lechos compuestos de sedimentos gruesos tienden a desarrollar procesos de acorazamiento o blindaje, los cuales ocasionan una alta variabilidad espacial y temporal en el arrastre de fondo. Este aspecto se debe entre otras cosas a las complejas relaciones existentes entre los caudales sólidos y líquidos, la heterogeneidad de la estructura del lecho y los procesos hidráulicos asociados.

Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo cuantificar, por medio de fórmulas empíricas; tasas de transporte de fondo, en suspensión y totales en los ríos Santa Isabel y Málaga, dos ríos de pendiente fuerte y altamente acorazados localizados a 85 Km al Este de la ciudad de Cochabamba, Bolivia, para un amplio rango de caudales y muestreo de sedimentos espacialmente distribuido. Consecuentemente, se han comparado tasas de transporte medidas y calculadas, así como las tasas de transporte y caudales líquidos para la evaluación de curvas de regresiones óptimas, válidas para ambos ríos.

Materiales y Métodos

Cuando un río está compuesto de una mezcla de diferentes tamaños de partículas, cada una de éstas resiste diferentes magnitudes de esfuerzos de corte. Por consiguiente, el flujo de agua puede poner en movimiento más fácilmente el sedimento fino que el grueso.

A través de este hecho teórico, se puede explicar el desplazamiento selectivo de las partículas más finas en el tiempo, del lecho originalmente bien gradado, después de lo cual, solamente las partículas más gruesas permanecen el sitio (ver Fig. 1)



Figura 1.- Lechos blindados en los ríos Santa Isabel y Málaga (de izquierda a derecha)

Los ríos Santa Isabel y Málaga son torrentes con lechos altamente acorazados compuestos de grava gruesa, cantos rodados medianos y grandes y bolones. Las pendientes promedio de los lechos son del 3.81 y 4.64 % para ambos ríos respectivamente.

Durante el trabajo de campo, se llevaron a cabo 33 mediciones de caudales sólidos y líquidos en cada río en una sección transversal representativa, relevamientos batimétricos y tres campañas de muestreo espacial de sedimentos en tramos de longitudes conocidas.

Para el muestreo superficial o de área, se empleó el método de Wolman Modificado presentado en Bunte & Abt (2002). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 1, donde σ_g es la desviación estándar geométrica = $(D_{84}/D_{16})^{0.5}$.

Tabla 1.- Tamaño medio de partículas de sedimento y σ_g para los ríos Santa Isabel y Málaga

Río	D_{90} (mm)	D_{84} (mm)	D_{50} (mm)	D_{30} (mm)	D_{16} (mm)	σ_g
Santa Isabel	233.5	137.9	63.7	33.8	19.5	2.7
Málaga	209.1	144.7	73.2	40.8	25.9	2.4

El rango de caudales medidos fue de 0.43 a 26.73 m^3s^{-1} para el río Santa Isabel y de 0.31 a 26.58 m^3s^{-1} para el río Málaga respectivamente.

El arrastre de fondo fue medido por medio de un muestreador tipo trampa Helley-Smith en varios puntos en los lechos de ambos ríos. Para el transporte en suspensión, se utilizaron recipientes de plástico de 2 litros.

Para la medición del transporte en suspensión se empleó la siguiente expresión (Romero & Fernández, 2007):

$$g_{BS} = C U \int_{2d_{50}}^d \left[1 + \left(\frac{U_*}{kU} \left[1 + \log \frac{y}{d} \right] \right) \right] dy \quad [1]$$

Donde g_{BS} : carga total en suspensión, en $Kgm^{-1}s^{-1}$, C : concentración en suspensión, en $mg l^{-1}$, U : velocidad media de flujo, en ms^{-1} , U_* : velocidad de corte, en ms^{-1} , k : constante de Von Karman (=0.4), d : profundidad media de

flujo, en m, y: profundidad de agua desde la superficie a una distancia de $2d_{50}$ y d_{50} : diámetro en el cual el 50 % de la muestra es más fino en peso, en m.

Para la estimación del transporte de sedimentos de fondo, en suspensión y total se consideraron 20, 7 y 14 fórmulas empíricas respectivamente.

Evaluación de Resultados

Sobre la base de los resultados obtenidos, se concluye que un modelo exponencial representa de mejor forma la relación de caudal líquido Q_l vs. la tasa de transporte de fondo g_B para ambos ríos (ver Fig. 2 para el río Santa Isabel), con coeficientes de determinación $R^2 = 0.9999$ para el río Santa Isabel y $R^2 = 0.9998$ para el río Málaga.

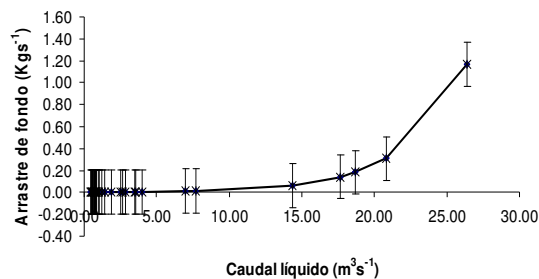


Figura 2.- Caudal líquido Q_l vs. tasa de transporte de fondo g_B para el río Santa Isabel; modelo exponencial, $R^2 = 0.9999$

Para el transporte en suspensión, un modelo logístico presentó los mejores resultados para una relación Q_l vs. g_{BS} para el río Santa Isabel ($R^2 = 0.9993$), en tanto que un modelo MMF resultó ser el más óptimo para el río Málaga ($R^2 = 0.9016$), donde ambos modelos se definen en las ecuaciones [2] y [3] respectivamente, siendo a , b , c y d coeficientes de regresión:

$$g_{BS} = \frac{a}{1 + be^{-cQ_l}} \quad [2]$$

$$g_{BS} = \frac{aQ_l + cQ_l^d}{b + Q_l^d} \quad [3]$$

Resultados similares se observan para las tasas de transporte total, siendo los modelos logístico y MMF los más satisfactorios para ambos ríos.

A manera de ilustración, la Figura 3 presenta el diagrama de dispersión entre las tasas de arrastre de fondo calculadas y medidas para el río Santa Isabel, donde las fórmulas empíricas mostradas presentaron valores aceptables del coeficiente de Nash & Sutcliffe COE .

Para la evaluación de las tasas en suspensión, la fórmula de Bagnold (1966) fue la única con valores aceptables de COE para ambos ríos, al igual que la fórmula de Brownlie (1982) para las tasas de transporte totales.

Los modelos restantes colapsan numéricamente debido a varios factores atribuibles a las condiciones de gran acorazamiento del lecho en ambos ríos y una gran resistencia al flujo: caudales de arrastre unitarios bajos, esfuerzos de corte insuficientes, velocidades de corte críticas mayores a las velocidades de flujo presentes, concentraciones de sedimento en suspensión observadas muy bajas, valores bajos del parámetro de movilidad F^* y del parámetro de transporte G^* y grandes valores del

número crítico de Froude del sedimento en relación al número de Froude actual

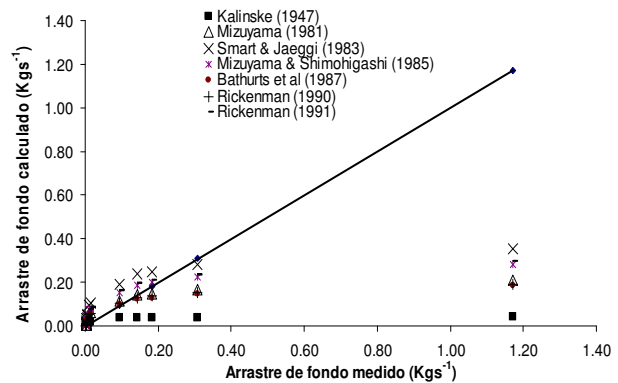


Figura 3.- Tasas de arrastre de fondo calculadas vs. arrastre de fondo medidas para el Río Santa Isabel por medio de las fórmulas empíricas con mejores coeficientes de Nash & Sutcliffe

Conclusiones

Por medio de la presente investigación, se ha cuantificado las tasas de transporte de fondo, en suspensión y totales para los ríos Santa Isabel y Málaga, los cuales son altamente acorazados.

Se obtuvieron curvas de ajuste óptimas que relacionan caudales líquidos y sólidos para los diferentes mecanismos de transporte, las cuales proveen de resultados confiables para las condiciones de flujo y rangos de caudales observados.

Todas las fórmulas empíricas evaluadas sobre-estiman las tasas de transporte de sedimentos por las razones expuestas anteriormente atribuibles al gran acorazamiento en ambos cauces. Estas causas originan que la gran mayoría de los modelos usados colapsen numéricamente.

La gran dispersión de los resultados ilustra los mecanismos complejos de transporte en ríos con gran acorazamiento, donde es necesaria la obtención de nuevas fórmulas válidas para torrentes en esta condición.

Referencias Bibliográficas

- Bagnold, R. A.** (1980): *An Empirical Correlation of Bedload Transport Rates in Flumes and Natural Rivers*, Proceedings of the Royal Society of London, A372, pp. 453-473.
- Bathurst J.C., Graf W.H. and Cao H.H.** (1987): *Bed Load Discharge Equations for Steep Mountain Rivers*, In Thorne C.R., Bathurst J.C. y Hey R.D. (eds), "Sediment transport in Gravel-Bed Rivers", Wiley, Chichester, pp. 453-491.
- Bunte K. y Abt S.** (2002): *Sampling Surface and Subsurface Particle-Size Distribution in Wadable Gravel- and-Cobble-Bed Streams for Analyses in Sediment Transport, Hydraulics, and Streambed Monitoring*, Gen. Tech. Report RMS-GTR-74, USDA.
- Romero M. y Fernandez J.** (2007): *Quantification of Sediment Transport Rates in a High Mountain River in Bolivia*, Proceedings of the 5th International Symposium On Environmental Hydraulics ISEH 2007, Tempe, Arizona, 4 to 7 December, 2007, pp. 105-111.