



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)
Torres Sofer Casilla 6760, Cochabamba, Bolivia, Tel/Fax: +591-4 – 421 7370
E-mail: mromero@abirh.org - Web: <http://www.lh.umss.edu.bo>

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue el cuantificar por medio de fórmulas empíricas tasas del transporte de fondo, en suspensión y total en dos ríos fuertemente acorazados localizados a 85 Km al este de la ciudad de Cochabamba, Bolivia. Se evaluaron varias formulas empíricas de transporte. Se compararon tasas estimadas y medidas de arrastre de fondo y en suspensión, así como también tasas de transporte calculadas versus caudales líquidos para la obtención de la mejor curva de ajuste. En el estudio se observa que las fórmulas de Mizuyama (1981), Smart & Jaeggi (1983) y Bathurst et al (1987) son las que mejor cuantifican el transporte de fondo. La formula de arrastre en suspensión de Bagnold (1966) fue la única que produjo resultados aceptables, así como la fórmula de Brownlie (1982) para el arrastre total. La gran dispersión de los resultados producidos por los modelos evaluados ilustra la complejidad de los mecanismos de transporte presentes en un río altamente acorazado, y que el uso de fórmulas empíricas tradicionales debe efectuarse muy cuidadosamente. Se advierte la imperiosa necesidad de estudios adicionales para la obtención de nuevos modelos más apropiados para este tipo de ríos.

ABSTRACT

The aim of the present research was to quantify through empirical formulas bed load, suspended and total sediment transport rates at two highly armoured steep rivers located 85 Km east from the city of Cochabamba, Bolivia. Several empirical transport models were tested. Calculated and measured values of bed load and suspended rates were compared, as well as calculated sediment transport rates versus liquid discharges for a best fitting curve. Bed load transport rates are better quantified by formulas of Mizuyama (1981), Smart & Jaeggi (1983) and Bathurst et al (1987). The suspended transport formula of Bagnold (1966) was the only one to produce acceptable results as well as the formula of Brownlie (1982) for the total transport rates. The scattered results by the several tested models illustrate the complex transport mechanisms present in a highly armoured mountain river, and that the present use of traditional formulas should be done carefully. It is strongly noticed the need of additional studies for further developing of new and most appropriate models for this kind of rivers.

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.

Por consiguiente, el objetivo de la presente investigación es la cuantificación por medio de fórmulas empíricas tasas del transporte de fondo, en suspensión y total en los ríos Santa Isabel y Málaga; dos ríos fuertemente acorazados localizados a 85 Km al este de la ciudad de Cochabamba, Bolivia, para un rango de caudales amplio y muestreo de sedimentos espacialmente distribuido. Por lo tanto, se compararon valores medidos y estimados de tasas de arrastre de fondo y en suspensión, así como también montos de transporte versus caudales líquidos para la obtención de una mejor curva de ajuste.

MATERIALES Y MÉTODOS

Bathurst et al (1987) sostienen que los ríos de pendiente fuerte se caracterizan por tener lechos compuestos de partículas de sedimento de gran tamaño y alturas de escurrimiento del mismo orden de magnitud.

El cociente entre el ancho de la sección transversal y la profundidad de flujo es grande y puede exceder fácilmente el valor de 100 para caudales bajos. En estos cauces, la resistencia al flujo es fuerte, con valores típicos del coeficiente de Manning de entre 0.04 a 0.2 $\text{m}^{-1/3}\text{s}$. Las pendientes promedio del lecho están entre 5 al 10 %. Para pendientes menores, el curso del río está compuesto mayormente de bolones y peñascos, con probables secuencias de formas tales como pozas-caídas.

Debido a las fuertes pendientes existentes, las tasas de caudales líquidos son muy variables. Los números de Froude pueden alcanzar valores supercríticos. Sin embargo, en la mayoría de los torrentes estudiados en el mundo, el número de Froude es usualmente subcrítico (Bathurst, 1978; Jarrett, 1984; Romero et al, 2010).

En río de pendiente fuerte, el movimiento incipiente de las partículas de sedimentos es

retrasada y obstaculizada no solamente por el tamaño de partículas más grandes, sino por la disposición y agrupamiento de las mismas y las formas del lecho, siendo estos factores causantes de un incremento en la resistencia al flujo (López, 2005). Por consiguiente, los ríos de pendiente fuerte son considerados como estables, debido a que solo para grandes caudales se observan tasas de transporte de sólidos, o el sedimento es puesto en movimiento.

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.

La descripción anterior es muy frecuente en ríos de pendiente fuerte, donde el sedimento grueso se encuentra en la parte superior del lecho, en tanto que los estratos sub-superficiales más finos se encuentran por debajo. A este fenómeno se lo conoce como el acorazamiento o blindaje del lecho del río (Martín Vide, 2003).

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).

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.



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

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 muestran 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
Malaga	209.1	144.7	73.2	40.8	25.9	2.4

El rango de caudales medidos fue de 0.43 a 26.73 m³s⁻¹ para el río Santa Isabel y de 0.31 a 26.58 m³s⁻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 (ver Figura 2). 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⁻¹s⁻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.



Figura 2.- Muestreo espacial con el marco metálico propuesto por Bunte & Abt (2002) y un muestreador Helley-Smith siendo usado en el río Santa Isabel

A manera de ilustración, la Tabla 2 presenta las tasas de transporte máximas y mínimas medidas para el arrastre de fondo, en suspensión y transporte total para los ríos Santa Isabel y Málaga.

Tabla 2.- Tasas de transporte máximas y mínimas para el arrastre de sedimentos en los ríos Santa Isabel y Málaga

Río	Arrastre de fondo (Kgs ⁻¹)		Arrastre en suspensión (Kgs ⁻¹)		Arrastre total (Kgs ⁻¹)	
	mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo
Santa Isabel	0.002	1.170	0.003	242.480	0.005	243.652
Malaga	0.000	1.367	0.007	18.004	0.007	19.371

Para la estimación del transporte o arrastre 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. 3 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.

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 m coeficientes de regresión (ver Fig.4)

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

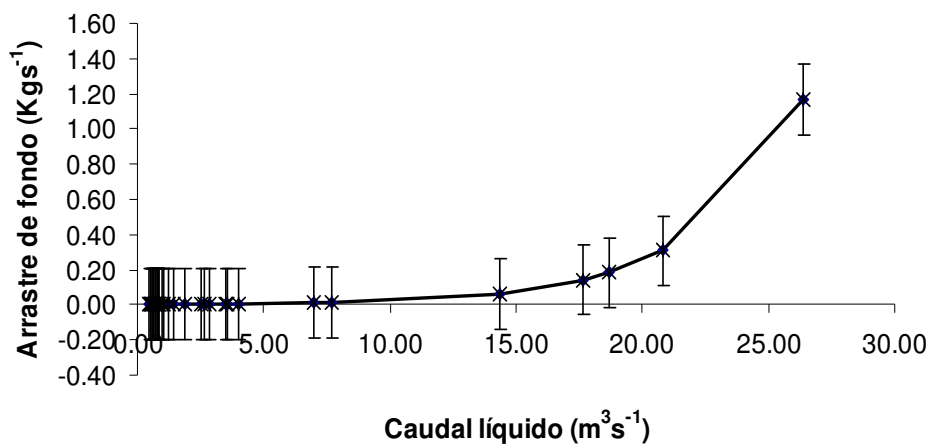


Figura 3.- Caudal líquido Q_l vs. tasa de arrastre de fondo g_B para el río Santa Isabel; modelo exponencial, $R^2 = 0.9999$

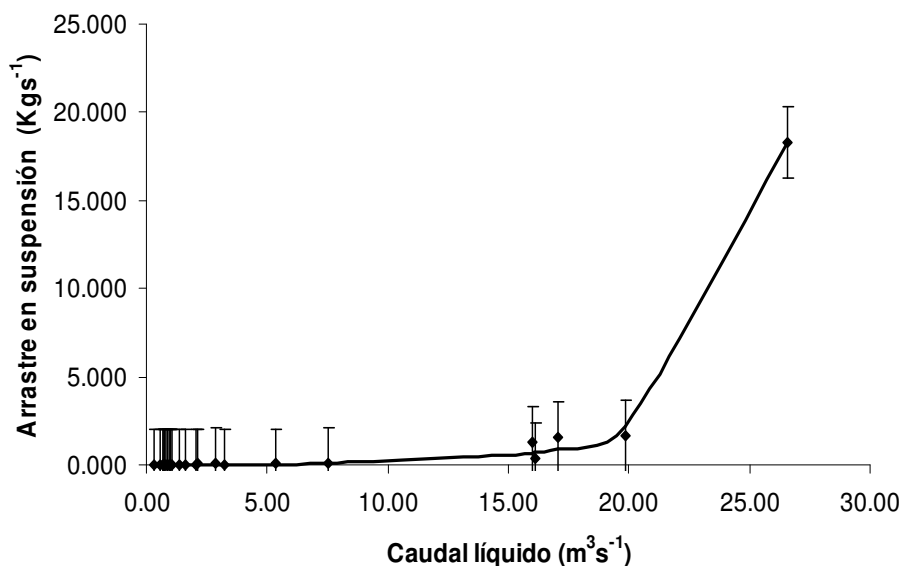


Figura 4.- Caudal líquido Q_l vs. tasa de arrastre en suspensión g_{BS} para el río Málaga; modelo MMF , $R^2 = 0.9016$

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

$$g_{BS} = \frac{aQ_l + cQ_l^m}{b + Q_l^m} \quad (3)$$

Se evaluaron veinte fórmulas empíricas de arrastre de fondo en el presente estudio: MacDougall (1934), Shields (1936), Einstein-Brown (1950), Schoklitsch (1950), Kalinske (1947), Meyer-Peter & Müller (1948), Levi (1948), Sato (1958), Rottner (1959), Barekian (1962), Yalin (1963), Inglis & Lacey (1968), Mizuyama (1981), Parker et al (1982), Smart & Jaeggi (1983), Van Rijn (1984), Mizuyama & Shimoighashi (1985), Bathurst et al (1987), Rickenman (1990) y Rickenman (1991).

Para el transporte en suspensión, se evaluaron los siguientes modelos: Einstein (1950), Brooks (1957), Velikanov (1958), Bagnold (1966), Engelund & Fredsoe (1976), Van Rijn (1984) y Guo & Wood (1996).

Se aplicaron las formulas de Laursen (1958), Colby (1964), Bagnold (1966), Engelund & Hansen (1967), Graf & Acaroglu (1968), Shen & Hung (1971), Yang (1973), Ackers & White (1973), Karim & Kennedy (1981), Brownlie (1982), Zanke (1982), Smart (1984), Yang (1984) y Molinas & Wu (1996) para la estimación del transporte total.

A manera de ilustración, la Figura 5 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 , el cual se define como (Romero & Vargas, 2008):

$$COE = 1 - \frac{\sum (Y_i - Q_i)^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (4)$$

Donde Y_i : tasa de arrastre de sedimento medida, Q_i : tasa de arrastre de sedimento estimada y \bar{Y} : tasa de arrastre estimada promedio.

Para el río Santa Isabel, los valores de COE obtenidos para las fórmulas de Mizuyama (1981), Smart & Jaeggi (1983) y Bathurst et al (1987) fueron -3.50, -20.20 y -2.60 respectivamente, donde valores negativos de COE significan que todas las formulas evaluadas sobre-estiman las tasas de arrastre de fondo

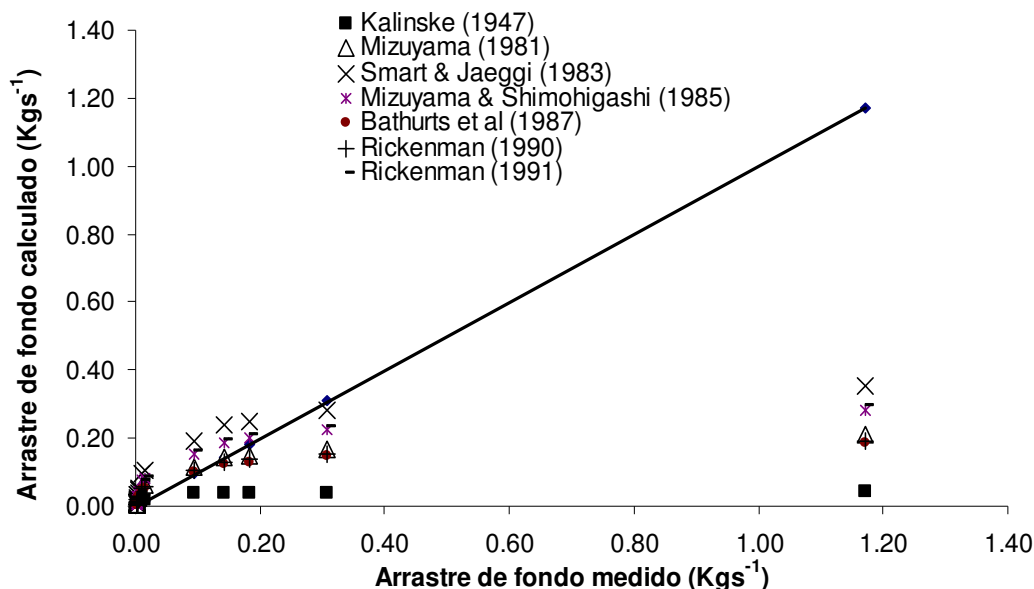


Figura 5.- Tasas de arrastre de fondo calculadas vs. arrastre de fondo medidas para el Río Santa Isabel por medio de las fórmulas empíricas con mejores coeficientes de Nash & Sutcliffe COE

Para el río Málaga se encontraron resultados similares con valores de COE de -4.91, -25.17 y -2.17 para las mismas fórmulas empíricas señaladas en el párrafo anterior.

Para la evaluación de las tasas en suspensión, la fórmula de Bagnold (1966) fue la única con valores aceptables o regulares de COE para ambos ríos; $COE = -60.4$ y -194.4 para los ríos Santa Isabel y Málaga respectivamente, al igual que la fórmula de Brownlie (1982) para las tasas de transporte totales; $COE = -21.10$ (río Santa Isabel) y -101.64 (río Málaga).

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 (Schoklitsch, 1950), esfuerzos de corte insuficientes (Meyer-Peter & Müller, 1948), velocidades de corte críticas mayores a las velocidades de flujo presentes (Levi, 1948; Berekian, 1962), concentraciones de sedimento en suspensión observadas muy bajas (Brooks, 1957; Engelund & Hansen, 1967; Van Rijn, 1984; Guo & Word, 1996), valores bajos del parámetro de movilidad F^* y del parámetro de transporte G^* (Ackers & White, 1973) y grandes valores del número crítico de Froude del sedimento en relación al número de Froude actual (Brownlie, 1982).

CONCLUSIONES

Por medio de la presente investigación, se ha cuantificado 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.

LISTA DE SÍMBOLOS

- a,b,c: constantes de regresión
C: concentración en suspensión
COE: Coeficiente de Nash & Sutcliffe
 $D_{16,84}$: tamaño característico de la partícula en la cual el 16 ó 84 % de las mismas es más fina por conteo
 D_{50} : tamaño característico de la partícula en la cual el 50 % de las mismas es más fina en peso
d: profundidad media de flujo
 g_B : tasa de transporte de fondo
 g_{BS} : carga total en suspensión
k: constante de Von Karman
m: constante de regresión
 O_i : tasa de arrastre de sedimento estimada
 Q_i : caudal líquido
U: velocidad media de flujo
 U^* : velocidad de corte
 σ_g : Desviación estándar geométrica de los tamaños de las partículas
 Y_i : tasa de arrastre de sedimento medida
 \bar{Y} : tasa de arrastre estimada promedio
y: profundidad de agua desde la superficie a una distancia de $2D_{50}$

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. (1978). "Flow Resistance of Large-Scale Roughness", *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 104, No HY12, pp. 1587-1603.

Bathurst, J.C., Graf, W.H. & 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. & 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.

Jarrett, R. D. (1984). “Hydraulics of High-Gradient Streams”, *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 110, No. 11, pp. 1519-1539.

López, R. (2005). *Resistencia al Flujo de Ríos de Montaña, Desarrollo de Ecuaciones de Predicción*. Tesis Doctoral, Universitat de Lleida, Programa de Doctorado de Ingeniería, España, pp. 131-192.

Martín Vide, J. P. (2003). *Ingeniería de Ríos*. Edicions UPC, Barcelona, España.

Romero, M. & 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.

Romero, M., Revollo, N. & Molina, J. (2010). “Flow Resistance in Steep Mountain Rivers in Bolivia”, *Journal of Hydrodynamics*, ELSEVIER, Vol. 22, No. 5, Supplement pp. 702-705.

Romero, M. & Vargas, A. (2008). “Assessment of River Bank Protection Measures at a Steep High Mountain River in Bolivia”. *Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics RIVERFLOW 2008*, Vol. 2, Çeşme, Izmir, Turkey, 3 to 5 September, 2008, pp. 1557 – 1565.



Instituto de Recursos Hídricos



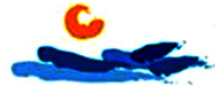
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnológicas



Universidad Nacional de Santiago del Estero



Instituto Nacional del Agua



Subsecretaría de Recursos Hídricos



Agencia Nacional de Promoción Cient. y Tec.



Gobierno Prov. de Santiago del Estero



Ministerio de la Producción



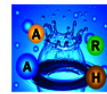
Secretaría del Agua



Secretaría de Desarrollo, Ciencia y Tecnología



Consejo Prof. de la Ingeniería y Arq.



Asociación Argentina de Recursos Hídricos



Asoc. Internacional de Invest. Hidroamb.



Comisión Regional del Río Bermejo



CORPORACION ARGENTINA TECNOLÓGICA s.a. INGENIERIA CIVIL E HIDRAULICA

