

**XXI CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SÃO PEDRO, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL, OCTUBRE, 2004**

TRANSPORTE DE SEDIMENTOS A DISTINTAS ESCALAS TEMPORALES

Pedro Abel Basile

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, FCEIA-UNR
Riobamba 245 bis, (2000) Rosario, Argentina
Telefax: +54 +341 4808541. E-mail: pbasile@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN: En este artículo se presenta la derivación de ecuaciones simplificadas para evaluar el transporte de sedimentos a escala temporal instantánea, a escala temporal de un evento de crecida y a escala temporal anual. Las ecuaciones contemplan el transporte de sedimentos del lecho como así también la carga de lavado en forma separada. La estructura funcional de las ecuaciones muestra que el transporte a diferentes escalas temporales puede expresarse mediante el producto de tres factores: un factor sedimentológico, un factor morfológico y un factor hidrológico. Las relaciones funcionales obtenidas han sido ajustadas utilizando datos sedimentológicos, morfológicos e hidrológicos disponibles en el río Bermejo en la estación Balapuca, en el río San Francisco en la estación Caimancito y en el río Pilcomayo en la estación La Paz.

ABSTRACT: In this paper the derivation of simplified sediment transport equations at instantaneous time-scale, at flood event time-scale and at annual time-scale is presented. The derived equations considers bed material transport as well as wash load in a separated way. The functional structure of the equations shows that the sediment transport at different temporal scales can be expressed by means of the product of three factors: a sedimentological factor, a morphological factor and an hydrological factor. The obtained relationships were adjusted by using available sedimentological, morphological and hydrological data in the Bermejo River at Balapuca, in the San Francisco River at Caimancito and in the Pilcomayo River at La Paz.

PALABRAS CLAVE: transporte de sedimentos, ecuaciones simplificadas, escalas temporales.

INTRODUCCIÓN

Existe un gran número de ecuaciones para calcular el transporte de sedimentos en función de los parámetros hidrodinámicos y de las características granulométricas del lecho. Las mismas han sido desarrolladas generalmente a través de experiencias de laboratorio y proporcionan valores de transporte notablemente diferentes, entre cada una de las mismas y con respecto a datos observados, cuando son superados los límites experimentales de los parámetros intervinientes. Esto es comprensible si se piensa en la variabilidad de los parámetros en juego cuando se pasa, por ejemplo, de ríos aluviales de llanura con régimen subcrítico, velocidad del orden del metro al segundo, no-uniformidad granulométrica moderada, diámetro medio del orden del milímetro; a ríos aluviales montanos y pedemontanos con régimen supercrítico, velocidad de varios metros por segundo, acentuada no-uniformidad granulométrica, diámetro medio del orden del decímetro. Es decir, en condiciones muy diferentes en lo que respecta al rol de las fuerzas viscosas, a la influencia de las formas de fondo sobre la resistencia al escurrimiento y a los efectos de la no-uniformidad granulométrica. Este último efecto juega un rol fundamental porque condiciona en buena medida las características de resistencia al flujo, degenera el perfil de velocidad cercano al fondo, induce fenómenos de protección/exposición y procesos de acorazamiento dinámico (Basile, 2000, 2002). Es interesante obtener relaciones funcionales simplificadas, que puedan ser ajustadas en función de la información morfológica, sedimentológica e hidrológica disponible en el curso de agua y utilizadas para aplicaciones prácticas a diferentes escalas temporales. En el presente trabajo se derivan algunas expresiones simplificadas para evaluar el transporte de sedimentos a escala temporal instantánea, a escala temporal de una onda de crecida y a escala temporal anual. Dichas relaciones funcionales han sido ajustadas utilizando datos sedimentológicos, morfológicos e hidrológicos disponibles en los ríos Bermejo (estación Balapuca), San Francisco (estación Caimancito) y Pilcomayo (estación La Paz).

TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DEL LECHO

Transporte instantáneo

La capacidad de transporte de sedimentos del lecho es representada por una relación funcional entre parámetros hidrodinámicos y sedimentológicos locales del curso de agua. Las ecuaciones de transporte pueden representarse mediante expresiones que vinculan dos grupos adimensionales:

$$\Phi = \alpha \tau_*^\beta \quad (1)$$

donde Φ es el transporte adimensional y τ_* es la tensión de corte adimensional:

$$\Phi = \frac{Q_s}{B \sqrt{(s-1)g} d_{50}^3}, \quad \tau_* = \frac{\tau_b}{g(\rho_s - \rho) d_{50}} \quad (2a) \text{ y } (2b)$$

con Q_s : transporte instantáneo volumétrico total de sedimentos, B : ancho de la sección; $s=\rho_s/\rho$: gravedad específica del sedimento, siendo ρ_s la densidad del sedimento y ρ la densidad del agua; g : aceleración de la gravedad; d_{50} : diámetro para el cual el 50% del material es más fino y τ_b : tensión de corte sobre el fondo.

Es interesante obtener relaciones funcionales simplificadas que puedan ser ajustadas en función de la información morfológica, sedimentológica e hidrológica disponible y utilizadas para aplicaciones prácticas a diferentes escalas temporales. Mediante la ecuación de resistencia de Manning-Strickler se puede eliminar la influencia de la profundidad de flujo en la relación (1), obteniéndose:

$$Q_s = \alpha_s \frac{d_{90}^v}{d_{50}^w} \frac{S_b^x}{B^y} Q^z \quad (3)$$

donde d_{90} es el diámetro para el cual el 90% del material es más fino, S_b es la pendiente del fondo, Q el caudal líquido, α_s es un coeficiente y los exponentes son: $v=\beta/10$, $w=\beta-3/2$, $x=7\beta/10$, $y=(3\beta/5)-1$, $z=3\beta/5$.

En la expresión anterior el d_{90} se relaciona con las características de rugosidad del fondo mientras que el d_{50} es el diámetro representativo o característico de la composición granulométrica del lecho que controla el transporte global de sedimentos. La ecuación (3) puede adaptarse para el cálculo del transporte por clases granulométricas introduciendo la fracción f_i de la i -ésima clase presente en el lecho y un coeficiente de protección/exposición: $\xi_i=(d_i/d_m)^b$ que modifica el transporte de la misma clase, donde d_i es el diámetro representativo de la i -ésima clase y d_m es el diámetro medio aritmético (Di Silvio et al., 1993; Basile, 2000, 2001):

$$Q_{s_i} = \alpha_s \frac{d_{90}^v f_i}{d_m^b d_i^{w'}} \frac{S_b^x}{B^y} Q^z \quad (4)$$

donde $w'=w-b$. Efectuando en la ecuación (4) la sumatoria sobre el número de clases granulométricas N , el transporte global se expresa como:

$$Q_s = \sum_{i=1}^N Q_{s_i} = \alpha_s \Pi_S \Pi_M \Pi_{HI} \quad (5)$$

donde Π_S es un factor sedimentológico, Π_M un factor morfológico y Π_{HI} un factor hidrológico instantáneo, dados por:

$$\Pi_S = \frac{d_{90}^v}{d_m^b} \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{d_i^{w'}} \quad , \quad \Pi_M = \frac{S_b^x}{B^y} \quad , \quad \Pi_{HI} = Q^z \quad (6a), (6b) \text{ y } (6c)$$

Transporte de sedimentos durante el tránsito de una onda de crecida

Para determinar el transporte global producido por una crecida es necesario integrar la ecuación (5) sobre la duración de la onda. Considerando que durante el tránsito de la crecida el factor morfológico y el sedimentológico no sufren sustanciales modificaciones (la cual es una hipótesis razonable en el caso de eventos hidrológicos ordinarios) y asumiendo un hidrograma simplificado de forma triangular, con caudal pico Q_p , caudal base Q_b , tiempo al pico t_p y tiempo de base t_b , se obtiene:

$$Q_{sF} = \int_0^{t_b} Q_s dt = \eta \Pi_S \Pi_M \Pi_{HF} \quad (7)$$

donde $\eta = (2 \alpha_s)/(z+1)$, el factor sedimentológico Π_S es dado por (6a), el factor morfológico Π_M es dado por (6b) y el factor hidrológico a escala temporal de un evento de crecida Π_{HF} se expresa como:

$$\Pi_{HF} = \frac{(Q_p^{z+1} - Q_b^{z+1})}{(Q_p^2 - Q_b^2)} V_F \quad (8)$$

donde V_F es el volumen de la onda de crecida. Si $Q_b=0$, el factor hidrológico queda expresado como una función del caudal pico y del volumen de la onda de crecida:

$$\Pi_{HF} = Q_p^{z^*} V_F \quad (9)$$

con $z^*=z-1$. Se nota que la estructura funcional de (7) es igual a la de (5). Sin embargo, en la ec. (5) el factor hidrológico es función del caudal líquido instantáneo Q , mientras que en la ec. (7) el factor hidrológico es función del caudal pico Q_p y del volumen V_F de la onda de crecida, como lo indica la ec. (9).

Transporte de sedimentos a escala temporal anual

El transporte de sedimentos a escala temporal anual es obtenido a partir de la integración de la ecuación (5) sobre la duración de un año. A escala intra-anual puede pensarse que, en años hidrológicos ordinarios, la

cantidad de sedimento que alcanza la red hidrográfica es aproximadamente igual a la cantidad de material transportado por la corriente hídrica. De esta manera, a parte de modestos procesos estacionales de erosión y depósito (compensados en un período relativamente breve, generalmente dentro del mismo año) las características sedimentológicas del lecho y la morfología del curso de agua permanecen invariables. Es decir, en cada sección del curso de agua, la pendiente del fondo, el ancho de la sección y la composición del lecho asumen valores tales que permiten transportar el aporte ordinario de sedimentos originado en la cuenca de influencia. Esto se puede definir como equilibrio morfoclimático entre la configuración morfo-sedimentológica del curso y las características de clima, relieve, litología, suelo y cobertura vegetal de la cuenca que lo alimenta.

La curva de duración de caudales líquidos, en ríos caracterizados por crecidas de gran magnitud y baja permanencia de caudales, puede ser representada analíticamente mediante una función exponencial rápidamente decreciente del tipo:

$$Q(t) = Q_0 e^{-\gamma t/t_a} \quad (10)$$

donde $Q(t)$ es el caudal líquido instantáneo de duración t (es decir, igualado o superado durante un tiempo t) γ es un coeficiente de distribución ($\gamma \gg 1$), Q_0 es el caudal máximo anual y t_a es la duración total igual a un año. Reemplazando (10) en (5) e integrando se obtiene el transporte anual expresado como:

$$Q_{sA} = \int_0^{t_a} Q_s dt = \psi \Pi_S \Pi_M \Pi_{HA} \quad (11)$$

donde $\psi = \alpha_s/z$, el factor sedimentológico Π_S es dado por (6a), el factor morfológico Π_M es dado por (6b) y el factor hidrológico a escala temporal anual Π_{HA} se expresa como:

$$\Pi_{HA} = Q_0^{z^*} V_A \quad (12)$$

donde V_A es el volumen de escurrimiento anual y z^* ya fue definido anteriormente ($z^*=z-1$). Se observa que la estructura funcional de (11) es igual a la de (7), sin embargo, en el caso de la ecuación (11), el factor hidrológico es función del caudal líquido máximo anual Q_0 y del volumen de escurrimiento anual V_A , como lo expresa la ecuación (12). La integral (11) fue simplificada considerando $\gamma \gg 1$.

RELACIONES FUNCIONALES PARA CARGA DE LAVADO

La carga de lavado o carga foránea Q_{wl} se relaciona generalmente con el caudal líquido instantáneo Q mediante expresiones del tipo:

$$Q_{wl} = \alpha_{wl} Q^\zeta \quad (13)$$

donde α_{wl} es un coeficiente que se asocia a los procesos de erosión en la cuenca, Q^ζ está representando el factor hidrológico instantáneo y el exponente ζ adopta valores cercanos a 2.

Si consideramos un hidrograma triangular, igual al utilizado en la derivación del transporte de sedimentos del lecho durante el tránsito de una onda de crecida, e integramos la ecuación (13) sobre la duración de la onda se obtiene:

$$Q_{wlF} = \eta_{wl} \frac{(Q_p^{\zeta+1} - Q_b^{\zeta+1})}{(Q_p^2 - Q_b^2)} V_F \quad (14)$$

donde $\eta_{wl} = (2 \alpha_{wl})/(\zeta+1)$. Para $Q_b=0$ la ecuación (14) se expresa como:

$$Q_{wlF} = \eta_{wl} (Q_p^{\zeta^*} V_F) \quad (15)$$

con $\zeta^* = \zeta - 1$ y el término entre paréntesis está representando el factor hidrológico a escala temporal de onda de crecida, el cual es función del caudal pico Q_p y del volumen V_F de la crecida.

A escala temporal anual podemos integrar la ecuación (13) asociándole una curva de duración de caudales líquidos idéntica a la (10), de esta manera se obtiene:

$$Q_{wlA} = \vartheta_A (Q_0^{\zeta^*} V_A) \quad (16)$$

donde $\vartheta_A = \alpha_{wA} / \zeta$ y el término entre paréntesis representa el factor hidrológico a escala temporal anual, el cual es función del caudal líquido máximo anual Q_0 y del volumen de escurrimiento anual V_A .

PRESENTACIÓN DE LOS DATOS UTILIZADOS

Para el ajuste de las ecuaciones de transporte han sido utilizados los datos disponibles en la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación-Argentina, referidos a mediciones de caudales líquidos, mediciones de transporte de sedimentos en suspensión y series de caudales líquidos medios diarios en los ríos Bermejo (estación Balapuca), San Francisco (estación Caimancito) y Pilcomayo (estación La Paz).

La información de los aforos líquidos y sólidos para cada una de las estaciones consisten en la profundidad de la corriente hídrica, el caudal líquido instantáneo, el área mojada, el ancho superficial, la velocidad media de la corriente hídrica, el caudal sólido en suspensión de la fracción fina ($d < 62 \mu\text{m}$) y el caudal sólido en suspensión de la fracción gruesa. Además, se utilizaron series de caudales líquidos medios diarios correspondientes a los períodos 1972-1999 (río Bermejo-Balapuca), 1947-1999 (río San Francisco-Caimancito), 1961-1999 (río Pilcomayo-La Paz). En la Tabla 1 se presenta un resumen de los rangos de variación de los principales parámetros hidráulicos y sedimentológicos correspondientes a los datos de los aforos de los tres ríos mencionados precedentemente.

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En las Figuras 1, 2 y 3 se presenta la composición del transporte en suspensión en función del caudal líquido para los ríos Bermejo (Balapuca), San Francisco (Caimancito) y Pilcomayo (La Paz), respectivamente. En los tres ríos se observa que cuando el caudal líquido supera los $100 \text{ m}^3/\text{s}$ el porcentaje de la fracción fina en el transporte en suspensión es superior al 80 %. Para caudales comprendidos entre 10 y $100 \text{ m}^3/\text{s}$, en el río Bermejo se observa que dicho porcentaje disminuye ligeramente, pero todavía se mantiene la preponderancia de la fracción fina. Mientras que, para el mismo rango de caudales ($10\text{-}100 \text{ m}^3/\text{s}$), en los otros dos ríos no se observa el predominio neto de la fracción fina.

Debido al diferente origen del sedimento que compone el transporte en suspensión se realizó un análisis en forma separada para ambas fracciones. Se determinaron las ecuaciones de regresión entre transporte en suspensión y caudal líquido instantáneo, discriminado entre la fracción fina asociada a la carga de lavado ($d < 62 \mu\text{m}$) y la fracción gruesa asociada al material del lecho. En la Tabla 2 se presentan las ecuaciones de regresión que vinculan el transporte instantáneo Q_s de la fracción gruesa y el caudal instantáneo Q para cada uno de los ríos considerados. El coeficiente k en dicha Tabla está representando el producto entre el coeficiente α_s , el factor sedimentológico Π_s y el factor morfológico Π_M . El factor hidrológico es Q^z , donde el exponente z adopta el valor de 2,167 para el río Bermejo, 1,453 para el río San Francisco y 1,211 para el río Pilcomayo. Considerando, por ejemplo, el valor de z obtenido para el río San Francisco ($z=1,453$), podemos determinar los valores de los exponentes que intervienen en la ecuación (4): $\beta=2,42$ (aproximadamente $5/2$, es decir, similar al exponente de la tensión adimensional de corte en la ecuación de Engelund y Hansen), $v=0,242$; $w=0,92$; $x=1,694$ e $y=0,452$. Además, adoptando para el exponente de la función de protección-exposición el valor $b=0,8$ (Basile, 2000) se determina $w'=0,12$. Por lo tanto, a partir de z se definen los exponentes que intervienen en el factor sedimentológico (v , w' y b) en la ecuación (6a) y los que intervienen en el factor morfológico (x e y) en la ecuación (6b).

En la Tabla 3 se presentan las ecuaciones de regresión que vinculan el transporte instantáneo Q_{wl} de la fracción fina y el caudal instantáneo Q para cada uno de los ríos considerados. En los tres ríos los

coeficientes de correlación son superiores a 0,8 y el exponente ζ adopta valores ligeramente superiores a 2 para los ríos Bermejo y San Francisco, mientras para el río Pilcomayo $\zeta \approx 1,8$. En las Figuras 4, 5 y 6 se observa la correspondiente representación gráfica del transporte en suspensión de la fracción fina y gruesa en función del caudal líquido instantáneo para los tres ríos.

Con los datos de caudales líquidos diarios se construyeron las curvas de duración y utilizando las ecuaciones de regresión determinadas precedentemente se determinaron las curvas de duración de caudales sólidos en suspensión para cada fracción y cada año. Las curvas de duración se integraron numéricamente y se calcularon los volúmenes de escurrimiento y los correspondientes transportes en suspensión de cada fracción para cada año. En la Tabla 4 se presentan las ecuaciones de regresión entre el transporte en suspensión anual de la fracción gruesa y el factor hidrológico a escala anual. El valor del exponente z^* obtenido en la regresión es aproximadamente igual a $z-1$, es decir, igual al obtenido a través de la integración analítica. Se observa que los coeficientes de correlación son superiores a 0,8 en los tres ríos y a su vez mayores que los obtenidos a escala temporal instantánea. Esto indica la fuerte vinculación del transporte a escala anual con el caudal máximo anual y con el volumen de escurrimiento anual, aún cuando estas dos últimas variables no muestren una correlación importante entre ellas. Por otra parte, la integración a nivel anual, promedia y atenúa los efectos de los desequilibrios presentes a escala temporal instantánea, produciendo de esta manera correlaciones mucho más significativas.

Un comportamiento similar se observa en las ecuaciones de regresión que vinculan el transporte anual de carga de lavado y el factor hidrológico a escala temporal anual, presentadas en la Tabla 5. En las Figuras 7, 8 y 9 se observa la correspondiente representación gráfica del transporte en suspensión a escala temporal anual de la fracción fina y gruesa, adimensionalizado con el volumen de escurrimiento anual V_A , en función del caudal líquido máximo anual para los tres ríos. En la Tabla 6 se presentan los valores de degradación específica, obtenidos utilizando los valores medios de transporte total de sedimentos en suspensión a escala temporal anual (fracción fina + fracción gruesa) y las áreas de las respectivas cuencas con cierre en las diferentes estaciones de medición.

CONCLUSIONES

Las ecuaciones simplificadas derivadas para calcular el transporte de sedimentos del lecho a distintas escalas temporales se expresan mediante el producto de tres factores: un factor sedimentológico, un factor morfológico y un factor hidrológico. El factor hidrológico que interviene en el cálculo del transporte instantáneo se asocia al caudal líquido instantáneo. En cambio, a escala temporal de un evento de crecida, el factor hidrológico es función del caudal pico y del volumen de la onda. Mientras que, a escala temporal anual, el factor hidrológico es función del caudal líquido máximo anual y del volumen de escurrimiento anual. Ecuaciones similares fueron obtenidas para evaluar la carga de lavado, la cual se expresa mediante el producto de un coeficiente asociado a los procesos de erosión en la cuenca y de un factor hidrológico que varía en función de la escala temporal considerada.

Los distintos exponentes y coeficientes de las ecuaciones fueron ajustados utilizando datos de los ríos Bermejo (Balapuca), San Francisco (Caimancito) y Pilcomayo (La Paz). Los valores de los coeficientes de correlación obtenidos para las expresiones de transporte a escala temporal anual son superiores a 0,8 en los tres ríos y a su vez mayores que los obtenidos a escala temporal instantánea. Esto pone de manifiesto la notable relación funcional del transporte a escala temporal anual con el caudal máximo anual y con el volumen de escurrimiento anual. Asimismo, la integración a nivel anual, suaviza en cierta manera los desequilibrios presentes a escala temporal instantánea, produciendo consecuentemente correlaciones mucho más significativas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Basile, P.A. (2000). *Revisión de ecuaciones de transporte modificadas para sedimentos heterogéneos*. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica – IAHR, Córdoba, Argentina. Tomo I, pp. 369-378.
- Basile, P.A. (2001). *On the Number of Fractions to Compute Transport of Sediment Mixtures*. International Journal of Sediment Research, ISSN 1001-6279, CN 11-2699/P. Vol. 16, N° 3, 2001, pp. 399-407.

Basile, P.A. (2002). *Modelo matemático hidro-morfo-sedimentológico para ríos con lechos constituidos por sedimentos de granulometría extendida*. XX Congreso Lat. de Hidráulica – IAHR, La Habana, Cuba.
 Di Silvio, G.; Basile, P.A.; Marion, A. y Peviani, M. (1993). *Overaggradation and Flooding in Mountain Basins: Prevention and Control*. XXV Congress of the IAHR. Tokio, Japón, Paper A-14-4, pp. 493-500.

Tabla 1: Rangos de variación de parámetros hidráulicos y sedimentológicos de los datos utilizados.

Río (Estación)	N	Q (m ³ /s)	U (m/s)	h (m)	Q _s (fr.fina) (kg/s)	Q _{wl} (fr.gruesa) (kg/s)
Bermejo (Balapuca)	40	12,6 - 1429,8	0,34 - 3,64	2,72 - 7,40	0,05 - 14893	0,05 - 2886,9
San Francisco (Caiman.)	41	14,9 - 788,9	0,52 - 2,69	3,97 - 1,86	0,3 - 9975,4	0,4 - 558,2
Pilcomayo (La Paz)	42	18,8 - 1713,5	0,78 - 2,21	2,01 - 5,35	16,7 - 56665	24,2 - 7712,7

Tabla 2: Ecuaciones de correlación que vinculan el transporte instantáneo Q_s y el caudal instantáneo Q.

Q _s = k Q ^z , con Q (m ³ /s), Q _s (m ³ /s)				
Río	Estación	k = α _s Π _S Π _M	z	R ²
Bermejo	Balapuca	6,484 x 10 ⁻⁸	2,167	0,828
San Francisco	Caimancito	7,809 x 10 ⁻⁶	1,453	0,731
Pilcomayo	La Paz	2,447 x 10 ⁻⁴	1,211	0,856

Tabla 3: Ecuaciones de correlación que vinculan el transporte instantáneo Q_{wl} y el caudal instantáneo Q.

Q _{wl} = α _{wl} Q ^ζ , con Q (m ³ /s), Q _{wl} (m ³ /s)				
Río	Estación	α _{wl}	ζ	R ²
Bermejo	Balapuca	4,578 x 10 ⁻⁸	2,655	0,833
San Francisco	Caimancito	7,534 x 10 ⁻⁷	2,283	0,872
Pilcomayo	La Paz	4,194 x 10 ⁻⁵	1,794	0,927

Tabla 4: Ecuaciones de correlación que vinculan el transporte Q_{SA} y el factor hidrológico a escala anual.

Q _{SA} = k _A (Q ₀ ^{z*} V _A), con Q ₀ (m ³ /s), V _A (m ³ /año) y Q _{SA} (m ³ /año)				
Río	Estación	k _A = ψ Π _S Π _M	z*	R ²
Bermejo	Balapuca	6,366 x 10 ⁻⁸	0,940	0,828
San Francisco	Caimancito	4,335 x 10 ⁻⁶	0,443	0,874
Pilcomayo	La Paz	2,113 x 10 ⁻⁴	0,193	0,923

Tabla 5: Ecuaciones de correlación que vinculan el transporte anual de carga de lavado y el factor hidrológico a escala anual.

Q _{wlA} = ϑ _A (Q ₀ ^{ζ*} V _A), con Q ₀ (m ³ /s), V _A (m ³ /año) y Q _{wlA} (m ³ /año)				
Río	Estación	ϑ _A	ζ*	R ²
Bermejo	Balapuca	2,470 x 10 ⁻⁸	1,460	0,894
San Francisco	Caimancito	1,618 x 10 ⁻⁷	1,298	0,923
Pilcomayo	La Paz	2,253 x 10 ⁻⁵	0,757	0,934

Tabla 6: Transporte sólido en suspensión total y degradación específica de la cuenca.

Río	Estación	Cuenca	A (km ²)	Q (módulo) (m ³ /s)	Q _{st} (medio) (Tn/año)	D.E. (Tn/km ² /año)
Bermejo	Balapuca	Bermejo Superior	4420	84	6862628	1553
San Francisco	Caimancito	San Francisco	25800	109	20416477	791
Pilcomayo	La Paz	Pilcomayo	96000	203	140860543	1467

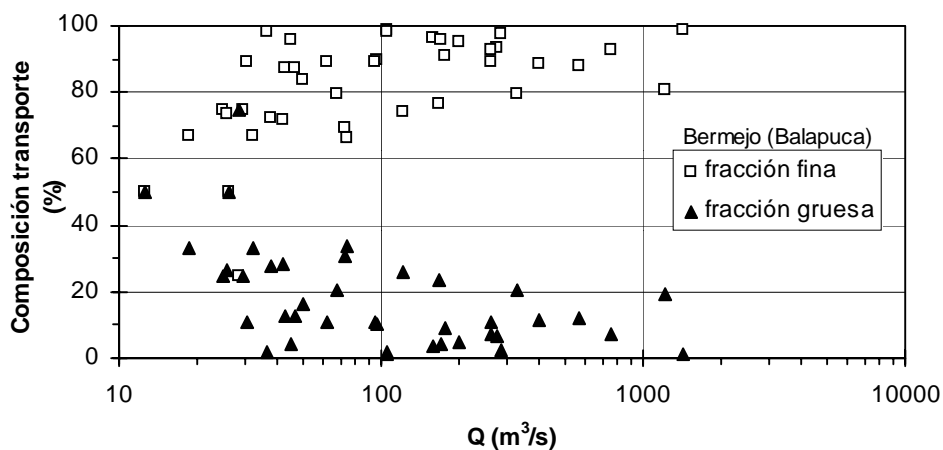


Figura 1: Composición del transporte en suspensión. Río Bermejo en la estación Balapuca.

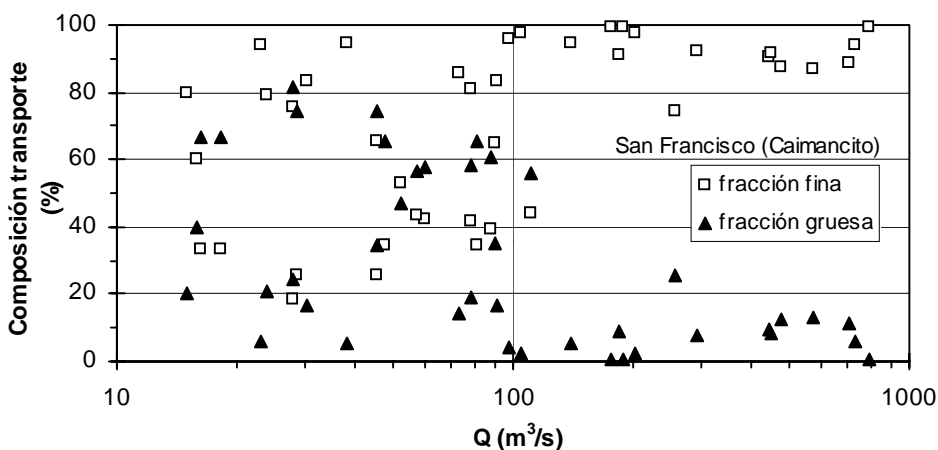


Figura 2: Composición del transporte en suspensión. Río San Francisco en la estación Caimancito.

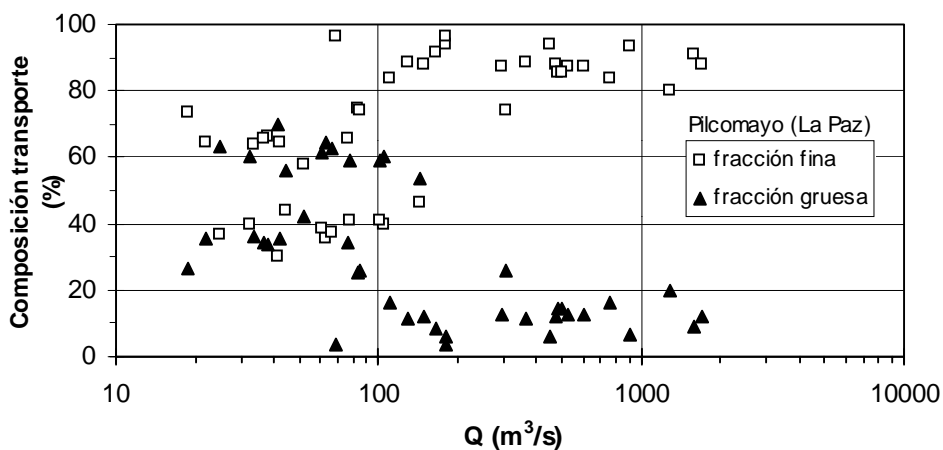


Figura 3: Composición del transporte en suspensión. Río Pilcomayo en la estación La Paz.

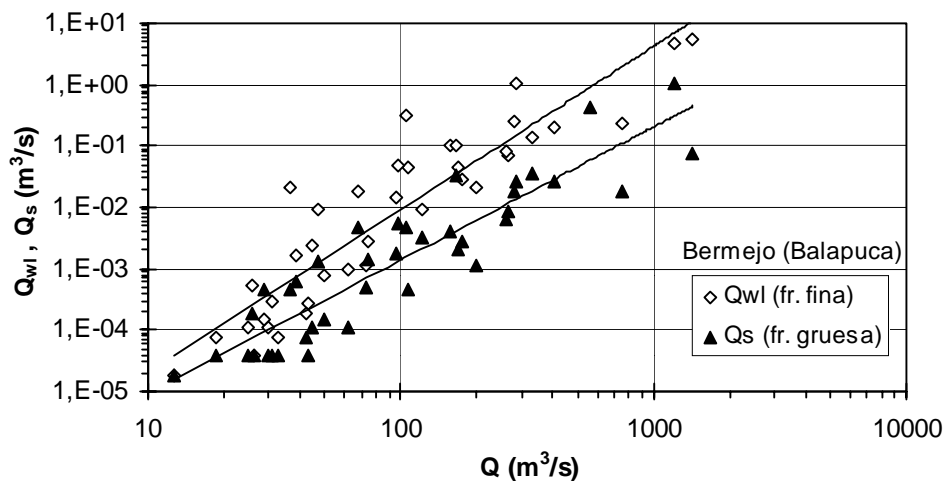


Figura 4: Transporte en suspensión de la fracción fina y gruesa en función del caudal líquido instantáneo. Río Bermejo en la estación Balapuca.

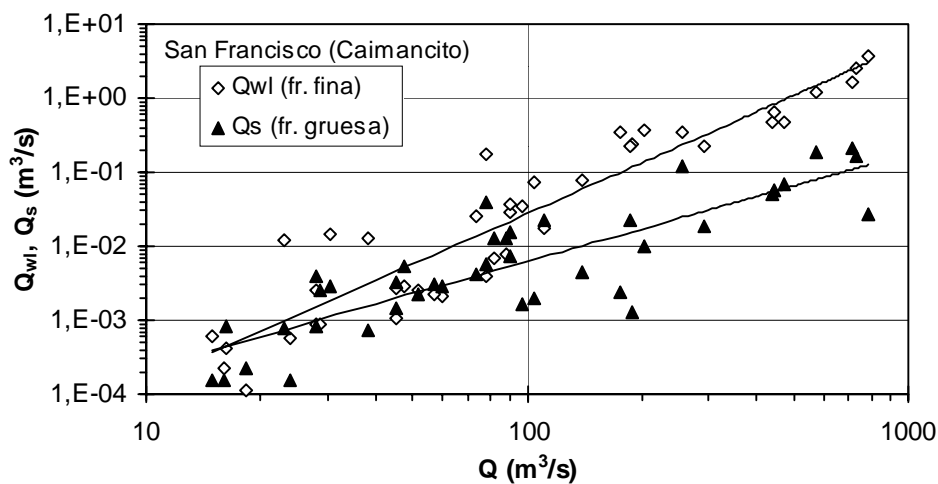


Figura 5: Transporte en suspensión de la fracción fina y gruesa en función del caudal líquido instantáneo. Río San Francisco en la estación Caimancito.

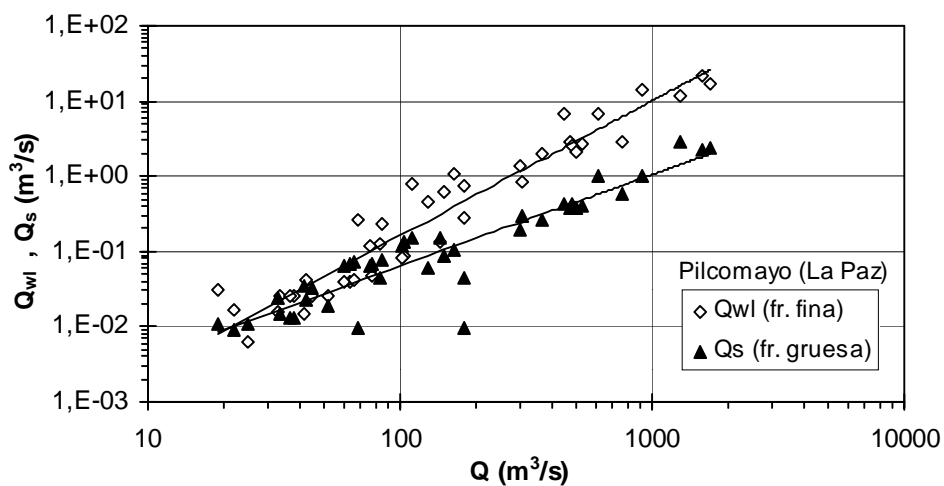


Figura 6: Transporte en suspensión de la fracción fina y gruesa en función del caudal líquido instantáneo. Río Pilcomayo en la estación La Paz.

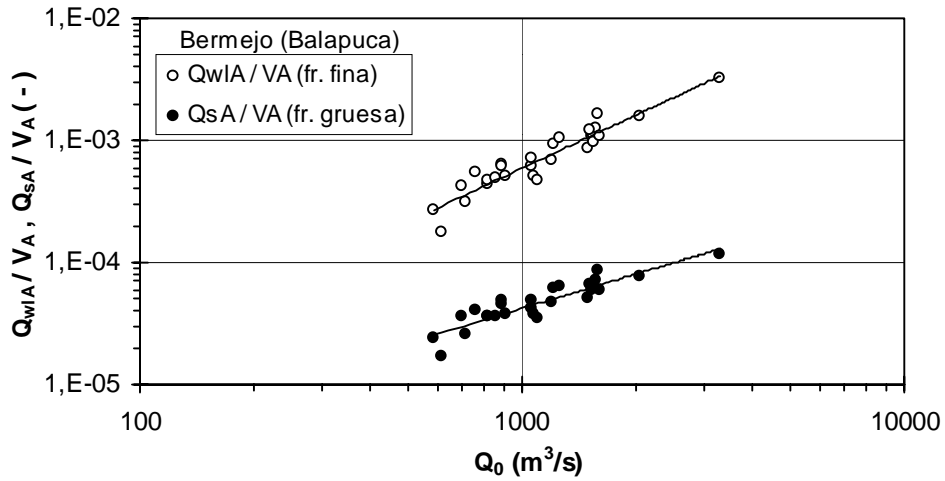


Figura 7: Transporte en suspensión anual de la fracción fina y gruesa, adimensionalizado con el volumen de escurrimiento anual, en función del caudal líquido máximo anual. Río Bermejo (Balapuca).

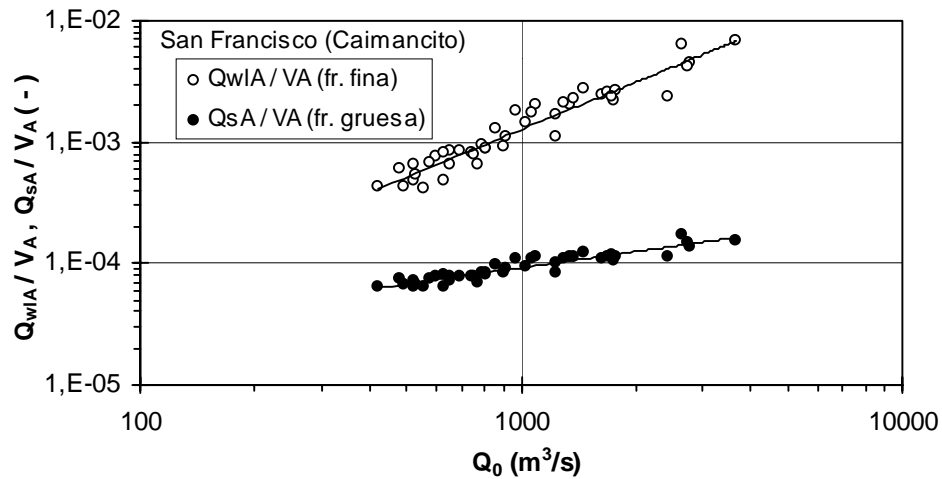


Figura 8: Transporte en suspensión anual de la fracción fina y gruesa, adimensionalizado con el volumen de escurrimiento anual, en función del caudal líquido máx. anual. Río San Francisco (Caimancito).

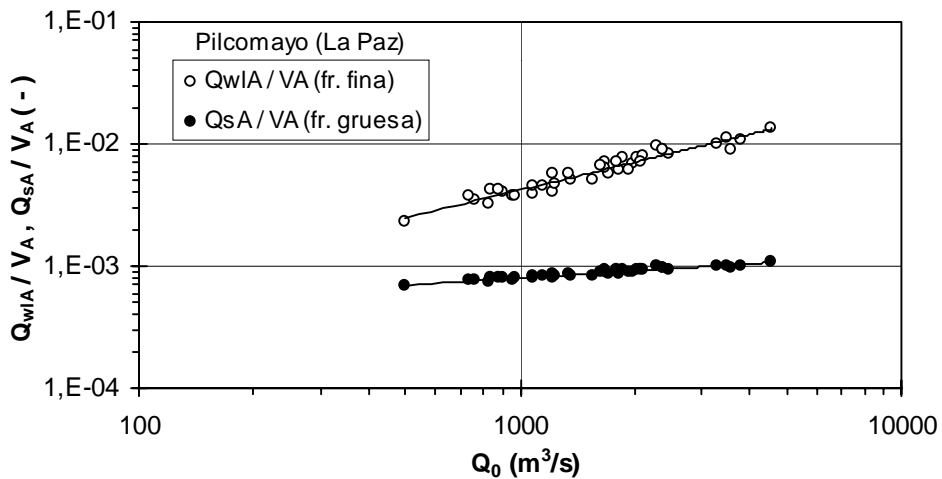


Figura 9: Transporte en suspensión anual de la fracción fina y gruesa, adimensionalizado con el volumen de escurrimiento anual, en función del caudal líquido máximo anual. Río Pilcomayo (La Paz).