

Quantification of sediment transport through direct measurements and the use of empirical models in an experimental catchment in the Andes Mountains, Southern Chile

Andrés Iroumé y Paula G.Y. Uyttendaele

*Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Casilla 567.
Valdivia, Chile. airoume@uach.cl*

Abstract

The quantification of sediment transport is very important in engineering studies and in the design of dams and bridges, but at the same time is one of the most difficult tasks to undertake. Sediment transport monitoring is expensive especially in small mountain catchments, and requires long records to account for its very high variability. This study summarizes the quantification of sediment transport and the validation of different sediment transport models in a 5.93 km² catchment located in the Andes Mountains in Southern Chile. From October 1997 to May 2005, total sediment transport was 7.1 * 10³ tons (mean sediment transport rate of 171 ton/year/km²) in which suspended sediment participated with the 55.7%. Suspended sediment transport varied between 17 and 1084 ton/year while bedload ranged from 14 to 677 ton/year. For a range of discharges lower than 2.14 m³/s the different transport models overestimated sediment transport, the exception being those proposed by Van Rijn and Bathurst. The Bathurst model is proposed for sediment transport estimation in ungauged mountain catchments near the study area.

Key words: Sediment transport, transport models, mountain catchment.

Cuantificación del transporte de sedimentos mediante mediciones directas y el uso de modelos empíricos en una cuenca experimental de la Cordillera de Los Andes, Sur de Chile

Resumen

La cuantificación del transporte sólido es muy importante en estudios de ingeniería y en el diseño de diques o puentes y, al mismo tiempo, es una operación muy difícil de realizar. El costo de las mediciones del transporte sólido es alto, sobretodo en pequeñas cuencas de montaña, y requiere además un monitoreo prolongado en el tiempo dada su extrema variabilidad. Este trabajo resume la cuantificación de la carga de transporte de materiales y la validación de diferentes modelos de transporte en una cuenca de montaña de 5,93 km² en el sur de Chile. Entre octubre 1997 y mayo 2005 la producción sólida total fue 7,1 * 10³ toneladas (tasa media de 171 ton/año/km²) con el 55,7% de sedimentos en suspensión. La producción de sedimentos en suspensión varió entre 17 y 1084 ton/año mientras que el transporte sólido de fondo fue entre 14 y 677 ton/año. Las fórmulas de transporte sólido aplicadas a un rango de caudales inferiores a 2,14 m³/s tienden a sobrestimar la producción de sedimentos, a excepción de los modelos de Van Rijn y Bathurst. Se sugiere el uso del modelo de Bathurst para estimar el transporte de sedimentos en cuencas sin información cercanas a la zona de estudio.

Palabras clave: Transporte de sedimentos, modelos de transporte, cuencas de montaña.

Introducción

El transporte sólido es un aspecto clave en los procesos fluviales y se relaciona directamente con la dinámica morfométrica de los ríos [1]. Los aportes de los sedimentos generados desde las laderas de las cuencas durante los periodos de tormentas son trasportados en los cauces en suspensión, mientras que los provenientes de las erosiones en la red de drenaje o desde las laderas adyacentes a la misma son movilizados principalmente como transporte de fondo o acarreo [2, 3]. Esta clasificación es más bien conceptual pues no existe un límite exacto para separar la fuente de origen y forma de transporte de los sedimentos [1].

El transporte sólido de fondo en cursos de agua con lecho de grava ha sido descrito por [4, 5] como un fenómeno de diferentes fases y en particular con dos condiciones del movimiento de los sedimentos. Superado el estado crítico del inicio del movimiento, en una primera fase el transporte de sedimentos se manifiesta con una intensidad moderada junto a un determinado umbral del caudal líquido, mientras que en la segunda fase la intensidad de arrastre de fondo aumenta. El umbral del caudal líquido que define el límite entre las dos fases del transporte sólido correspondería al caudal de cauce lleno [6, 7], aun cuando [5] asocia el inicio de la segunda fase con la ruptura del acorazamiento del lecho y [8] lo relaciona a un caudal igual al 80% del correspondiente al cauce lleno. La intensidad de transporte es mucho mayor en la segunda fase, que se manifiesta sólo durante intervalos de tiempos breves, sobre todo en pequeños cursos de agua de lecho de grava y alta pendiente, por lo que la mayor parte de la producción anual de los sedimentos se produciría durante la primera fase [9, 10].

El transporte sólido en suspensión estaría mas influenciado por la disponibilidad de sedimentos finos que por las características energéticas o hidrodinámicas del torrente [11]. El aporte del transporte sólido en suspensión al transporte sólido total es bastante variable y se sitúa en un rango de un 70 a 95% para ríos fluviales [3, 11] y entre 10-90% para torrentes en zonas de montaña [12-14]. Este amplio rango se debe principalmente a las variaciones espaciales y temporales del suministro y disponibilidad de materiales fi-

nos originados por los procesos de erosión en la cuenca, siendo los procesos de transporte en suspensión en ríos de montaña generalmente relacionados con crecidas aisladas o con periodos de derretimiento nival o glacial [11, 15, 16].

La cuantificación del transporte sólido de fondo es muy importante para los estudios de ingeniería que requieren la construcción de diques o puentes y, al mismo tiempo, es una de las operaciones más difíciles de realizar [17, 18]. El costo de las mediciones del transporte sólido es alto y requiere un monitoreo suficientemente prolongado en el tiempo, dado su extrema variabilidad [19]. Para suplir en parte esta limitante, en base a experimentos en laboratorio y mediciones en terreno se han desarrollado modelos que estiman tanto el transporte sólido de fondo (fórmulas del transporte de fondo) como el transporte total de sedimentos (incluyen el transporte de fondo y en suspensión), en función de las características del flujo, sedimentos, morfología y rugosidad del lecho y condiciones estacionarias de transporte [20, 21]. Graf [22] clasifica las ecuaciones de transporte en tres categorías: aquellas del tipo Du Boys en función de la fuerza crítica tangencial [23], las del tipo Schoklitsch en función del caudal crítico [24] y finalmente las que consideran probabilidades de transporte [25].

El objetivo de este trabajo es presentar los resultados de la cuantificación de la carga de transporte de materiales en un torrente de montaña en el sur de Chile, y analizar su variabilidad interanual y su comportamiento durante una crecida. Adicionalmente, con la validación de diferentes modelos de transporte de sedimentos se espera contribuir al diseño de obras hidráulicas, en una zona de gran expansión turística caracterizada por una urbanización creciente y la construcción de redes de caminos en áreas sensibles.

Metodología

Área de estudio

Corresponde a la cuenca del estero Tres Arroyos de 5,93 km² de superficie. Se localiza entre los 38°25,5' y 38°27' S y 71°32,5' y 71°35' W y es controlada con una estación fluviométrica localizada a cota aproximada 1095 msnm, Figura 1. En la ubicación de la sección de aforo el cauce tiene una pendiente longitudinal de 7,6% y de

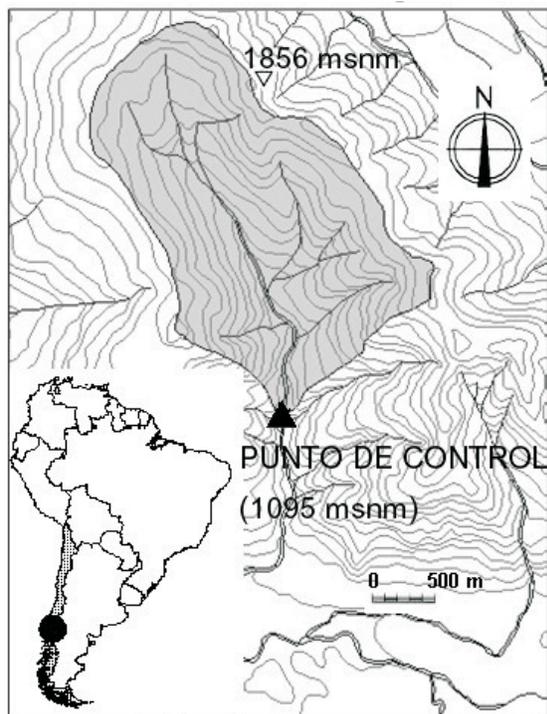


Figura 1. Cuenca experimental del Estero Tres Arroyos.

la curva granulométrica del material que compone el lecho, generada mediante la técnica de muestreo de Wolman [26], se determina que el D_{16} es 0,0154 m. Los suelos son de origen volcánico, de textura areno-limosa teniendo, en pro-

medio, poco más del 60% de arena gruesa y algo menos del 30% de limo. Casi el 79% de la superficie está cubierta por bosques naturales prácticamente inalterados dominados por *Nothofagus spp.* y *Araucaria Araucana*, y el 21% restante corresponde a cenizas volcánicas arenosas en las partes altas sobre el límite altitudinal de la vegetación.

Los parámetros físicos principales de la cuenca se resumen en la Tabla 1. Mayores detalles de las características topográficas, geomorfológicas, climáticas y de suelos del área de estudio y de la cuenca del estero Tres Arroyos pueden verse en Iroumé [27].

Sedimentos en suspensión, caudal sólido de arrastre y relación con los caudales líquidos

La concentración de sedimentos en suspensión (CSS) se obtuvo a través de muestras de aproximadamente 0,33 litros colectadas mensualmente y durante algunos eventos de crecida en la estación fluviométrica del estero Tres Arroyos. Las muestras fueron filtradas y pesadas según lo describen Probst [28] e Iroumé [29].

El muestreo de arrastre de fondo se realizó mensualmente y durante algunos eventos de crecida en la localización de la estación fluviométrica, utilizando un tomador de muestras de lecho

Tabla 1
Características fisiográficas de la cuenca del Estero Tres Arroyos

Parámetros	Valor
Área de la cuenca (km ²)	5,93
Perímetro (km)	10,61
Altitud máxima (msnm)	1856
Altitud mínima (msnm)	1095
Altitud media de la cuenca (msnm)	1544,2
Pendiente media de la cuenca (%)	39
Longitud del cauce principal (km)	3,65
Longitud total de cauces (km)	10,27
Pendiente del cauce principal (%)	21
Número de orden	3
Cauces de orden uno	8
Densidad de drenaje (km/km ²)	1,72

(o bed load sampler) tipo Helley-Smith, según lo indicado por Simons y Sentürk [3], Whittaker [13] y Slattery y Burt [16]. El caudal sólido de arrastre (Q_s) se obtuvo a partir del peso total de material de arrastre capturado en cada muestreo.

Durante las campañas de terreno se registró la hora para determinar el caudal (Q) al momento del muestreo y generar las relaciones entre CSS y Q y entre Q_s y Q según lo propuesto por Simons y Sentürk [3], Bathurst *et al.* [12], Beschta [15], Probst [28] e Iroumé [29]. Las relaciones entre CSS y Q y entre Q_s y Q se utilizan para calcular la carga anual de transporte de sedimentos en suspensión, de fondo y total, usando el método del balance parcial según Probst [28] e Iroumé [29]:

$$TST = TSS + TSF = K_1 \sum CSS_i Q_i t_i + K_2 \sum Q_{si} t_i \quad (1)$$

siendo TST, TSS y TSF la carga total de sedimentos, carga de sedimentos en suspensión y carga de sedimentos de fondo, respectivamente, para un período determinado de tiempo, CSS_i y Q_i la concentración de sedimentos en suspensión y el caudal medio de cada fase, t_i la duración de cada fase entre mediciones de Q en que se divide el período de cálculo y Q_{si} el caudal sólido de arrastre medio de cada fase. K_1 y K_2 son constantes función de las unidades de las variables, para asegurar la estabilidad dimensional de la ecuación (1).

Modelos de transporte de sedimentos

Las mediciones del transporte sólido de fondo en el Estero Tres Arroyos se comparan con las estimaciones obtenidas con los siguientes modelos de transporte: Meyer-Peter *et al.* [30], Meyer-Peter y Muller [31], Bagnold [32], Schoklitsch [24], Engelund y Hansen [33], Graf *et al.* [34], Smart y Jaeggi [35], Van Rijn [21] y Bathurst *et al.* [12]. Para poder comparar los resultados, los valores de transporte se expresaron en términos de la intensidad de transporte adimensional o parámetro de Einstein, definido por.

$$\Phi^* = \frac{q_v}{(g\Delta D_{50}^3)^{1/2}} \quad (2)$$

con q_v el caudal sólido volumétrico de fondo por unidad de ancho de la sección mojada ($m^3/s/m$).

En las ecuaciones de transporte sólido se utilizó la fórmula de la resistencia al flujo propuesta por Thompson y Campbell [36], las relaciones geométricas de la sección representativa del cauce (es decir las relaciones entre el tirante hidráulico y el ancho mojado, el área mojada, el perímetro mojado y el radio hidráulico), los diámetros característicos obtenidos de la curva granulométrica del lecho del cauce en la sección de control y los valores para peso específico del agua = 9810 N/m^3 ; γ_s peso específico de los sedimentos = 26500 N/m^3 ; Δ densidad relativa de un grano inmerso igual a 1,65; g constante de la aceleración de la fuerza gravitacional igual a $9,81 \text{ m/s}^2$; ν viscosidad del agua = $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; y, $\lambda = 0,986$ en la fórmula de Meyer-Peter y Muller [31].

Resultados y Discusión

Relaciones entre concentración de sedimentos en suspensión y caudal, y entre caudal sólido de fondo y caudal

La curva de ajuste entre la concentración de sedimentos en suspensión (CSS , mg/L) y caudal al momento del muestreo (Q , m^3/s) es:

$$CSS = 27,356 * Q^{1,899} \quad (R^2 = 0,47, n = 34) \quad (3)$$

La curva de ajuste entre Q_s (caudal sólido de fondo, g/s) y Q (caudal, m^3/s) es:

$$Q_s = 68,74 * Q^{1,9} \quad (R^2 = 0,37, n = 96) \quad (4)$$

Las ecuaciones (3) y (4) son estadísticamente significativas (t Student, $p \leq 0,01$) y se usan para calcular el transporte de sedimentos en suspensión, de fondo y total utilizando el método del balance parcial definido en la ecuación (1). En la Figura 2 se presenta la producción anual de sedimentos en suspensión y de fondo (sedimentos gruesos mayores a 20 mm) para el período octubre 1997-mayo 2005, durante el cual se estima una producción sólida de $7,1 * 10^3$ toneladas, con una participación de un 55,7% de los sedimentos en suspensión. En dicha figura se observa la gran variabilidad interanual característica de este proceso, ya que el transporte total de sedimentos varía entre 31 ton/año para 1998 y 1483 ton/año para el 2003. Esta variabilidad está en parte asociada a los montos anuales de precipitación, ya que las lluvias son las responsables de

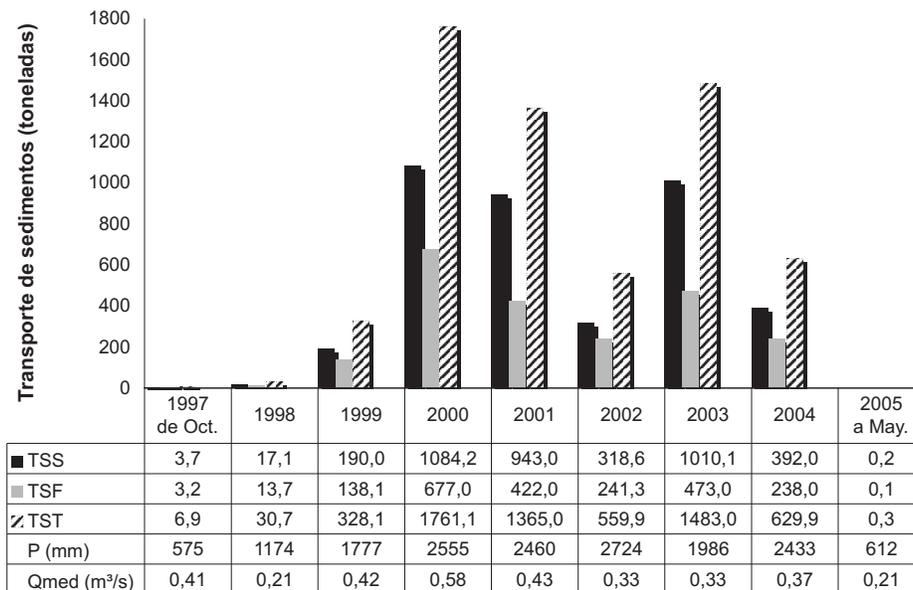


Figura 2. Transporte sólido anual de sedimentos (ton/año) total (TST), en suspensión (TSS) y de fondo (TSF) en toneladas, en el Estero Tres Arroyos.

los procesos erosivos y de la generación de los caudales capaces de transportar los materiales en los cauces (ver en Figura 2 los valores de precipitación y caudales medios para los periodos estudiados). En problemas de ingeniería que requieran de valores medios, las tasas promedio de transporte de sedimentos del periodo 1997-2004 serían apropiados. Pero, en caso de necesitarse tasas máximas, se sugiere trabajar con los promedios de la serie 2000-2004 (años con precipitaciones anuales cercanas o mayores a 2000 mm y promedio para el periodo de 2432 mm/año), con los que se obtiene un valor para TSS de 750 ton/año, una producción de sedimentos de arrastre de fondo (> 20 mm) igual a 410 ton/año, y una producción sólida media anual de 1160 ton/año. Considerando la superficie de la cuenca (5,93 km²) la producción media anual de sedimentos en suspensión y de fondo (> 20 mm) es 126 y 69 ton/año/km² respectivamente, y el transporte sólido total de 195 ton/año/km².

Validación de modelos de transporte sólido

En la Figura 3 se muestran las intensidades de transporte sólido de fondo unitario (q_s en kg/m/s) en función del caudal líquido (m³/s) obtenidas de la aplicación de las ecuaciones de transporte sólido. También se presentan las in-

tensidades medidas en terreno con el muestreador Helley-Smith junto a la curva de producción de sedimentos de fondo (*rating curve*) definida empíricamente para el Estero Tres Arroyos. La *rating curve* corresponde a la formulación general de la ecuación (4) pero con los valores expresados en términos de la intensidad de transporte adimensional de la ecuación (2).

Las mediciones del transporte sólido en el torrente Tres Arroyos se realizaron para un rango de caudales que no excedió los 2,14 m³/s. Casi todas las ecuaciones probadas sobreestiman las intensidades de transporte para caudales inferiores a 2,14 m³/s, con la excepción de las propuestas por Bathurst *et al.* [12] y Van Rijn [21], Figura 3. Mao [37] analizó la estimación del transporte sólido con diferentes fórmulas, comparándolas con los registros en la estación experimental del Río Cordon, concluyendo que la mayoría de los modelos sobreestiman la producción de sedimentos y que sólo durante una crecida excepcional los registros son similares a las estimaciones de transporte de sedimentos. En general, los modelos consiguen simular bien el transporte sólido únicamente para las condiciones límite de la capacidad de transporte y con una disponibilidad ilimitada de sedimentos, situación que se alcanza durante crecidas muy breves y muy intensas [12, 37, 38]. Para Mao [37], en la estación del Río

Cordón las ecuaciones sobrestiman la intensidad de transporte de 2 a 3 veces órdenes de magnitud para las crecidas ordinarias y de al menos un orden de magnitud para la crecida extraordinaria registrada el 14 de septiembre de 1994.

Transporte sólido a nivel de crecida

Durante la crecida registrada entre 13 y 22 PM del 17 de septiembre de 2004, en la estación fluviométrica se recogió a intervalos de media y una hora el transporte sólido de fondo con el muestreador Helley-Smith. La última muestra de

transporte sólido fue obtenida 19 horas después del inicio de las mediciones y el caudal máximo registrado fue 0,84 m³/s. Los caudales líquidos y sólidos unitarios medidos se muestran en Figura 4.

El caudal sólido muestra dos máximos con el pico más importante durante la fase recesiva del hidrograma líquido, y por lo tanto se genera un *loop* antihorario, Figura 5. En base a mediciones del transporte sólido de fondo en tres ríos de montaña ubicados en Oregon y Alaska, Beschta [38] observó también un efecto histéresis antihorario

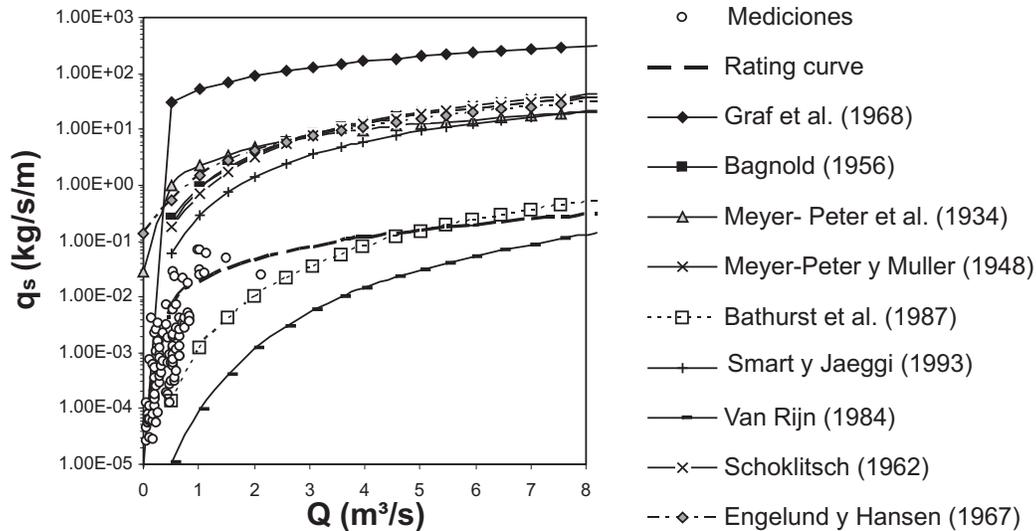


Figura 3. Intensidad de transporte de fondo fraccional (kg/s/m) en función del caudal (m³/s), Estero Tres Arroyos. Estimaciones coinciden con líneas mientras las mediciones con el bedload sampler aparecen como puntos.

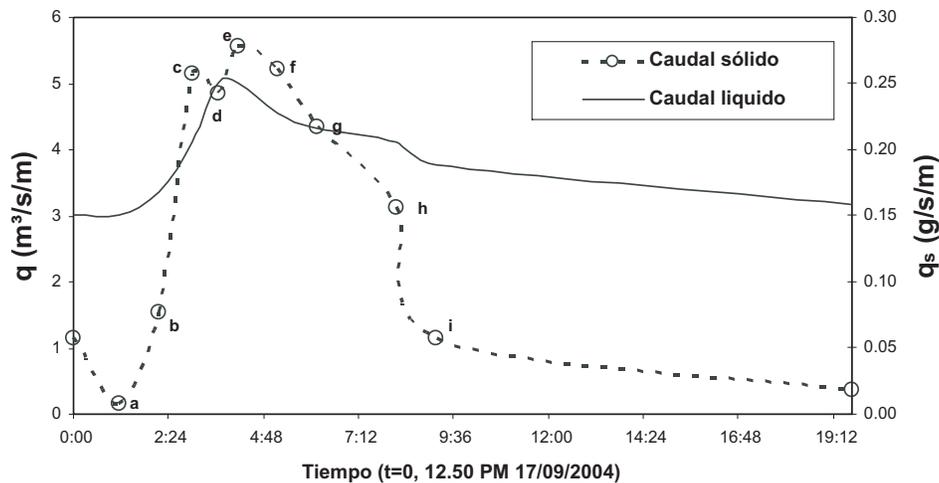


Figura 4. Caudales líquidos (m³/s/m) y sólidos (g/s/m) unitarios durante la crecida del 17 de septiembre de 2004, estación fluviométrica Estero Tres Arroyos.

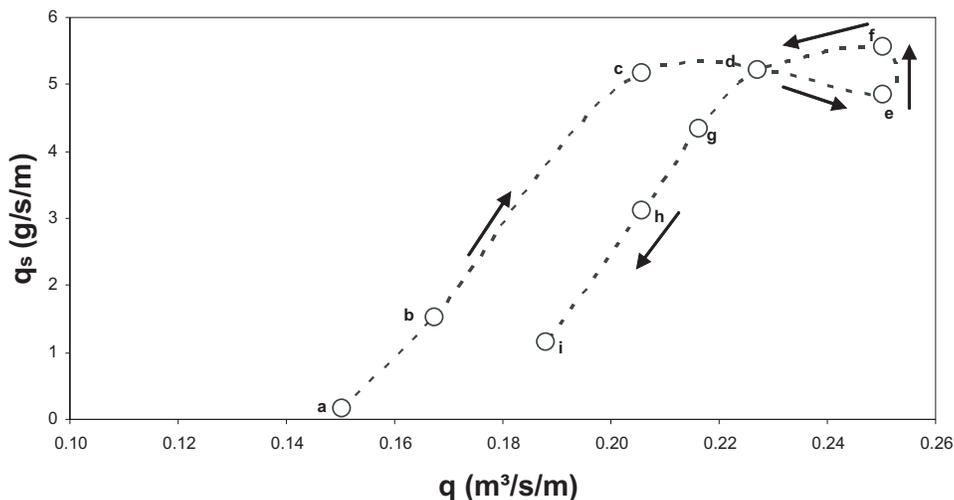


Figura 5. Efecto histéris del transporte sólido (*loop* anti-horario) durante la crecida del 17 de septiembre 2004, estación fluviométrica Estero Tres Arroyos.

rario entre el caudal líquido y sólido de fondo. Este mismo autor [38] concluye que el máximo caudal de los sedimentos en suspensión y de la materia orgánica precede el pico del hidrograma y, en consecuencia, se obtiene un *loop* horario, y que este comportamiento se debería a la disponibilidad limitada de la materia orgánica y de los sedimentos transportados en suspensión que tiende a reducirse considerablemente durante la fase inicial del evento.

Dado que en esta crecida los caudales fueron relativamente bajos, durante este evento se capturó principalmente material con diámetros inferiores a 20 mm. El transporte de la fracción granulométrica más fina (< 8 mm) fue continuo durante todo el evento, mientras que la fracción más gruesa (8 - 20 mm) ocurrió sólo en algunos momentos de la crecida. Las granulometrías son muy bajas al inicio y final del evento y siguen las tendencias del hidrograma.

Conclusiones

En la cuenca del estero Tres Arroyo, la producción sólida durante el periodo octubre 1997-mayo 2005 fue $7,1 \cdot 10^3$ toneladas, que corresponde a un transporte sólido medio de 171 ton/año/km², con una participación de un 55,7% de los sedimentos en suspensión. La producción de sedimentos en suspensión varía entre 17 y 1084 ton/año, mientras el transporte sólido de fondo (> 20 mm) alcanza valores entre 14 y 677

ton/año. Las diferencias son atribuidas a la magnitud de las crecidas.

El análisis de la crecida del 17 de septiembre 2004 muestra el efecto histéris del transporte sólido, que ocurre ya que el caudal sólido muestra dos máximos con el pico más importante durante la fase recesiva del hidrograma líquido, generándose por lo tanto un *loop* antihorario.

La mayoría de las fórmulas del transporte sólido basadas en las mediciones realizadas en terreno (con caudales hasta 2,14 m³/s) tienden a sobrestimar la producción de sedimentos, siendo la excepción las fórmulas propuestas por Van Rijn y Bathurst *et al.* Como primera aproximación se sugiere el uso del modelo de transporte de Bathurst para el diseño de obras hidráulicas en cuencas ubicadas en las cercanías de la zona de estudio.

Agradecimientos

Esta investigación es parte de una tesis de doctorado apoyada con fondos del Gobierno Chileno provenientes del programa Mecesus y de la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica. La tesis se realizó en el marco del programa de co-tutela existente entre la Universidad Austral de Chile y la Università degli Studi di Padova (Italia). El análisis de datos contó con el apoyo de los investigadores vinculados al proyecto internacional EPIC FORCE (INCO-CT2004-510739). Por último, los autores agradecen a la Dirección General de Aguas, Chile.

Referencias Bibliográficas

1. Uyttendaele, P.G.Y. "Procesos de transporte de sedimentos en áreas de montaña, comparación entre la cuenca del río Cordón (Alpes, Italia) y del estero Tres Arroyos (Andes, Chile)". Tesis Doctorado en Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, programa de co-tutela con Università degli Studi di Padova (Italia). 2006.
2. Bogardi, J., "Sediment transport in alluvial streams", Akadémiai Kiadó, Budapest, (1978).
3. Simons, D.B. y Sentürk, F., "Sediment transport technology", Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, (1977).
4. Emmett W.W., "Bedload transport in two large gravel-bed rivers, Idaho and Washington", In: Proceedings of Third Federal Interagency Sedimentation Conference, Sedimentation Committee of the Water Resource Council, Denver, Colorado, 4 (1976) 100-113.
5. Jackson W.L. y Beschta R.L., "A model of two-phase bedload transport in an Oregon Coast Range stream", Earth Surface Processes and Landforms, 7, (1982) 517-527.
6. Andrews E.D., "Bed-material entrainment and hydraulic geometry of gravel-bed rivers in Colorado", Geological Society of America Bulletin, 95, (1984) 371-378.
7. Andrews E.D. y Nankervis J.M., "Effective discharge and the design of channel maintenance flows for gravel-bed rivers", In: Natural and anthropogenic influences in fluvial geomorphology (Costa J.E., Miller A.J., Potter K.W. y Wilcock P.R. eds), American Geophysical Union Monograph Series, 89, (1995) 151-164.
8. Ryan S.E., Porth L.S. y Troendle C.A., "Defining phases of bedload transport using piecewise regression", Earth Surface Processes and Landforms, 27, (2002) 971-990.
9. Andrews E.D. y Smith J.D., "A theoretical model for calculating marginal bedload transport rates of gravel", In: Dynamics of gravel-bed rivers (Billi P., Hey R.D., Thorne C.R. y Tacconi P. eds), Wiley, Chichester, (1992) 41-52.
10. Lisle T.E., "Particle size variations between bed load and bed material in natural gravel bed channels", Water Resources Research, 31(4), (1995) 1107-1118.
11. Walling, D.E. y Webb, B.W., "Suspended load in gravel-bed rivers: UK experience", In: Sediment transport in Gravel-Bed Rivers (Thorne C.R., Bathurst J.C. y Hey R.D. eds), Wiley, Chichester, (1987) 545-579.
12. Bathurst J.C., Graf W.H. y Cao H.H., "Bed load discharge equations for steep mountain rivers", In: Sediment transport in Gravel-Bed Rivers (Thorne C.R., Bathurst J.C. y Hey R.D. eds), Wiley, Chichester, (1987) 453-491.
13. Whittaker J.G., "Sediment transport in step-pool streams", In: Sediment transport in Gravel-Bed Rivers (Thorne C.R., Bathurst J.C. y Hey R.D. eds), Wiley, Chichester, (1987) 545-579.
14. Billi P., D'Agostino V., Lenzi M.A. y Marchi L., "Bedload, slope and channel processes in a high-altitude Alpine torrent", In: Gravel-Bed Rivers in the Environment (Klingeman P., Beschta R., Komar P. y Bradley J. eds), Water Resources Publications, LLC, (1998) 15-38.
15. Beschta, R. L., "Conceptual models of sediment transport in streams", In: Sediment transport in Gravel-Bed Rivers (Thorne C.R., Bathurst J.C. y Hey R.D. eds), Wiley, Chichester, (1987) 387-419.
16. Slattery M.C. y Burt T.P., "Particle size characteristics of suspended sediment in hillslope runoff and stream flow", Earth Surface Processes and Landforms, 22, (1997) 705-719.
17. Emmet, W.W., "A field calibration of the sediment-trapping characteristics of the Helley-Smith bedload sampler", U.S. Geological Survey Professional Paper 1139, (1980).
18. Ryan S.E. y Troendle C.A., "Measuring bedload in coarse-grained mountain channel: procedure, problems and recommendations", In: Water Resources Education, Training and Practice: Opportunities for the Next Centuries, American Water Resources Association, (1997) 949-958.
19. Habersack H.M. y Laronne J.B., "Bed load texture in an alpine gravel bed river", Water Resour. Res., 37 (12), (2001) 3359-3370.

20. Einstein H.A., "Formulas of the transportation of bed load", Transactions of the American Society of Engineers, 107, Paper Number 2140, (1942) 561-573.
21. Van Rijn L.C., "Sediment transport, part I: bed load transport", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 110(10), (1984) 1431-1456.
22. Graf W.H., "Hydraulics of sediments transport", Mc. Graw Hill Book Co., (1971).
23. Du Boys M.P., "Etudes du régime et l'action exercée par les eaux sur un lit a fond de graviers indéfiniment affouillable", Annales des Ponts et Chaussées, Ser 5, (1879).
24. Schoklitsch A., "Handbuch des Wasserbaues", 3a ed., Springer-Verlag, Wien, Austria, (1962).
25. Einstein H.A., "The bedload function for sediment transport in open channel flows", Technical Bulletin No. 1026, Soil Conservation Service, USDA, Washington, D.C., (1950).
26. Wolman M.G., "A method of sampling coarse river-bed material", Trans. Am. Geophys. Union, 35, (1954) 951-956.
27. Iroumé, A., "Estudio de los procesos hidrológicos en una cuenca experimental forestal andina de la IX Región, Chile", Bosque 18(1), (1997) 73-81.
28. Probst, J.L., "Dissolved and suspended matter transported by the Girou River (France): mechanical and chemical erosion rates in a calcareous molasse basin", Hydrological Sciences Journal 31(1), (1986) 61-79.
29. Iroumé, A., "Assessment of runoff and suspended sediment yield in a partially forested catchment in Southern Chile", Water Resources Research 26(1 1), (1990) 2637-2642.
30. Meyer-Peter, E., Favre, H. y Einstein, A., "Neuere Versuchsergebnisse über den Geschiebetrieb", Schweiz, Bauzeitung, 103, (1934) 13.
31. Meyer-Peter, E. y Müller, R., "Formulas for bedload transport", In: 2nd Meeting Intl. Ass. Hyd. Structures Res., Stockholm, Sweden, Appendix 2, (1948) 39-64.
32. Bagnold R.A., "The flow of cohesionless grains in fluids", Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A, 249, (1956) 235-297.
33. Engelund F. y Hansen E., "A monograph on sediment transport in alluvial streams", Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark, (1967).
34. Graf W.H. y Acaroglu E.R., "Sediment Transport in Conveyance Systems (Part 1)", Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology, XIII(2), (1968).
35. Smart G.M. y Jaeggi M., "Sediment transport on steep slopes", V.A.W., Mitteil 64, Hydrologie und Glaziologie, ETH, Zurich, (1983).
36. Thompson S.M. y Campbell P.L., "Hydraulics of a large channel paved with boulders", J. Hydraul. Res., 17, (1979) 341-354.
37. Mao, L., "Analisi comparativa del trasporto solido di corsi torrentizi in diversi ambiti geografici", Tesis de Doctorado, Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Università degli Studi di Padova, (2004).
38. Beschta R.L., "Suspended sediment and bedload". In: Methods in Stream Ecology, (Hauer F.R. y Lamberti G.A.eds), Academic Press, (1983) 123-143.

Recibido el 13 de Septiembre de 2008
En forma revisada el 18 de Mayo de 2009