



Bosque

ISSN: 0304-8799

revistabosque@uach.cl

Universidad Austral de Chile

Chile

IROUME, ANDRES

Transporte de sedimentos en una cuenca de montaña en la Cordillera de los Andes de la Novena

Región de Chile

Bosque, vol. 24, núm. 1, enero, 2003

Universidad Austral de Chile

Valdivia, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=173114407010>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

[Inicio Web Revistas](#) [Web Biblioteca](#) [Contacto](#)

**Revistas Electrónicas UACH**

Sistema de Bibliotecas UACH





Artículos [Búsqueda artículos](#)

[Tabla de contenido](#) [Anterior](#) [Próximo](#) [Autor](#) [Materia](#) [Búsqueda](#) [Inicio](#) [Lista](#)



## Bosque (Valdivia)

ISSN 0717-9200 *versión on-line*

-  [Como citar este artículo](#)
-  [Agregar a favoritos](#)
-  [Enviar a e-mail](#)
-  [Imprimir HTML](#)

Bosque (Valdivia) v.24 n.1 Valdivia ene. 2003

Bosque, Vol. 24 N° 1, 2003, pp. 125-135

### NOTA TECNICA

## Transporte de sedimentos en una cuenca de montaña en la Cordillera de los Andes de la Novena Región de Chile<sup>\*</sup>

### Sediment transport in a mountainous catchment in the Andes of the Ninth Region of Chile

ANDRES IROUME

\* Investigación financiada por la Dirección General de Aguas.  
Instituto de Manejo Forestal, Universidad Austral de Chile, Casilla 567, Valdivia, Chile.

### Summary

The relative importance of the suspended and bed-load transport mechanisms were studied for a 40-month period in a 592.8-ha catchment in the Andes Mountains, in the Ninth Region of Chile. The relationships between suspended sediment concentrations and discharge, and bed load and discharge, were examined to calculate the total sediment load in 6,381 t from the studied catchment area. Suspended sediments comprise 26% of total load, whereas bed load comprises the remaining 74%, which differs from the results obtained for the forested

catchments located on clayed soils in the Tenth Region, where bed load was negligible compared with suspended load. For the study period, the mean annual specific degradation was  $323 \text{ t/km}^2$ , varying between 48 and  $700 \text{ t/km}^2$ . With a Melton Index of 0.313 upstream from the gauging station, the studied catchment behaves as a "bed-load" transport type of torrent. However, the sediment-transport mechanism characteristics and soil and topographic conditions of this catchment suggest that the major geomorphological changes in the drainage network are associated with torrential peak flows with high bed-load transport or with debris flows or floods.

*Key words:* sediment transport; suspended sediments; bed load.

## Resumen

Para un período de 40 meses se estudia la importancia relativa de los mecanismos de transporte de sedimentos en suspensión y acarreos, en una cuenca de 592,8 ha de la Cordillera de los Andes, en la Novena Región de Chile. Se desarrollaron relaciones entre concentración de sedimentos en suspensión y caudales y entre transporte de fondo y caudales, que permitieron cuantificar en 6,381 toneladas la carga total de sedimentos de la cuenca estudiada. Los sedimentos en suspensión participan con el 26% de la carga total mientras que los acarreos o arrastre de fondo con el 74% restante, situación que difiere de resultados en cuencas forestadas en suelos arcillosos de la Décima Región, donde los arrastres de fondo fueron insignificantes comparados con el transporte en suspensión. Para el período de estudio la degradación específica anual media es de  $323 \text{ t/km}^2/\text{año}$ , variando entre 48 y  $700 \text{ t/km}^2/\text{año}$ . Con un Índice de Melton de 0,313, hacia aguas arriba de la sección de control la cuenca de estudio se comporta como un torrente del tipo "transporte de fondo". Sin embargo, las características de los mecanismos de transporte de sedimentos y las condiciones de suelo y topográficas de la cuenca estudiada, parecen sugerir que los principales cambios geomorfológicos en la red de drenaje están asociados a fenómenos de crecidas torrenciales con gran transporte de fondo o con corrientes con alta concentración de sedimentos.

*Palabras claves:* transporte de sedimentos; sedimentos en suspensión; acarreos.

---

## INTRODUCCION

Los contenidos de materiales en suspensión en los cauces están estrechamente relacionados con los caudales y los aportes de sedimentos arrastrados por los escurrimientos superficiales de las laderas de las cuencas generados durante los períodos de tormentas ([Bogardi 1978](#), [Simons y Senturk 1977](#)). Sin embargo, los sedimentos transportados por los cauces no sólo provienen de las erosiones en las laderas sino que también de los procesos erosivos en la red de drenaje de las cuencas. Estos materiales, aportados por las erosiones en los propios cauces o desde las laderas adyacentes a los mismos, son transportados principalmente en forma de acarreos, proceso también conocido como transporte de fondo.

Otra forma de transporte de materiales la constituyen las coladas de piedras y barro, definidas como un tipo de movimiento en masa que involucra agua con diferentes concentraciones de materiales gruesos escasamente consolidados que descargan rápidamente pendiente abajo sobre la red de drenaje ([Vandine 1996](#)). Estas coladas (aluviones, debris flood o debris flow, dependiendo de la concentración de sedimentos y las características de fluido en movimiento) se registran generalmente en regiones montañosas, producto de lluvias muy intensas, y ocurren como un tipo de deslizamiento de gran velocidad, afectando la dinámica y funcionamiento de las cuencas e impacto en las poblaciones humanas que habitan en zonas aledañas ([Martínez y García 1990](#), [Sidle 1980](#)).

El transporte de sedimentos en cuencas forestales ubicadas en la Cordillera de la Costa de Chile ha sido documentado entre otros por [Iroumé \(1990, 1992\)](#), [Menke \(1999\)](#) y [Schulz \(2000\)](#). En estas investigaciones resulta que gran parte de la carga total de sedimentos es transportada en forma de suspensión y los volúmenes que acceden los cauces están vinculados a los procesos de erosión superficial que ocurren a tasas como las presentadas por [Oyarzún \(1993\)](#), [Stolzenbach \(1998\)](#) y [Rivas \(2000\)](#).

Este trabajo tiene por objetivo presentar los primeros resultados de una investigación que estudia los procesos de transporte de sedimentos en una cuenca experimental de montaña ubicada en la Cordillera de los Andes. Se muestra la importancia relativa de los mecanismos de transporte de sedimentos en suspensión y acarreos, y se analiza su dinámica en relación con las características de los caudales líquidos

## MATERIAL Y METODOS

*El área de estudio:* Corresponde a la cuenca experimental del estero Tres Arroyos, que se localiza entre los 38°25,5' y 38°27' de latitud sur y 71°32,5' y 71°35' de longitud oeste ([Dirección General de Aguas 2000](#)). Esta cuenca se ubica en la Reserva Forestal Malalcahuello, en la IX Región de la Araucanía, provincia de Malleco, comunas de Curacautín y Lonquimay, al interior cordillerano del río Cautín, junto a la localidad de Malalcahuello en la vertiente sur del Volcán Lonquimay.

La cuenca tiene una superficie de 592,8 ha. Los parámetros físicos principales y el tipo de cubierta vegetal de esta cuenca se resumen en el [cuadro 1](#).

CUADRO 1

Principales parámetros físicos y cubierta vegetal de la cuenca estudiada.  
Main physical parameters and vegetation cover of the study catchment.

Parámetro	Unidad	Cantidad
Superficie		
Perímetro	ha	592,8
Longitud cauce principal	km	10,61
Altitud mínima	km	3,65
Altitud máxima	ms.n.m.	1.095,0
Pendiente media de la cuenca	ms.n.m.	1.856,0
Pendiente media cauce principal		0,39
Densidad de drenaje		0,21
Uso del suelo:	km/km2	1,72
Matorral nativo		
Bosque achaparrado	ha	0,07
Tipo forestal Roble-Raulí-Coigüe	ha	21,51
Tipo forestal Araucaria	ha	73,90
Sin vegetación: cenizas volcánicas	ha	370,40
Cauces	ha	126,90
	ha	0,04

*Fuente:* Dirección General de Aguas (2000).

Los suelos de la cuenca son jóvenes y de origen volcánico, de textura areno-limosa, teniendo, en promedio, poco más del 60% de arena gruesa y algo menos del 30% de limo ([Dirección General de Aguas 2000](#)). Las velocidades de infiltración finales varían entre 25 y 400 cm/h.

La cuenca es controlada mediante una estación fluviométrica localizada a cota aproximada 1.095 ms.n.m., que corresponde a una sección natural del estero Tres Arroyos y que cuenta con un sensor de presión conectado a un datalogger para monitorear en forma continua el nivel de aguas. En la ubicación de la sección de aforo, el cauce del estero tiene una pendiente longitudinal de 3,5% y de la curva granulométrica del material que compone el lecho, generada mediante la técnica de muestreo propuesta por Wolman ([Wolman 1954](#)), se determina que  $d_{16}$  es 0,013 m (el 16% del material del lecho tiene un diámetro inferior a 0,013 m).

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 \(1997\)](#) y [Dirección General de Aguas \(2000\)](#).

*Sedimentos en suspensión y relación con los caudales líquidos:* La concentración de sedimentos en suspensión se obtiene a través de muestras colectadas manualmente en el cauce del estero Tres Arroyos, en la localización de la estación fluviométrica. La muestra es de aproximadamente 0,33 litros, y se completa con tres submuestras tomadas en un mismo número de diferentes posiciones en el cauce del estero Tres Arroyos. Estas posiciones coinciden con los lugares donde se instala el molinete durante los aforos y el muestreador de sedimentos de fondo. Las muestras son filtradas en el laboratorio de la Dirección Regional de Aguas, IX Región, en Temuco, y luego enviadas para el pesaje al Laboratorio Ambiental del Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos de la Dirección General de Aguas, en Santiago.

Al realizar el muestreo, se registra la hora para así determinar el caudal al momento del muestreo y poder generar las relaciones entre concentración de sedimentos y caudal. Según [Van-Sickle y Beschta \(1983\)](#), [Lootens y Lumbu \(1986\)](#), [Probst \(1986\)](#), [Probst y Bezarbachi \(1986\)](#), [Beschta \(1987\)](#) e [Iroumé \(1990\)](#), entre concentración de sedimentos en suspensión (C) y caudal al momento del muestreo (Q) se desarrolla en general una relación del tipo:

$$C = a Q^b \quad (1)$$

*Caudal sólido de arrastre y relación con los caudales líquidos:* El muestreo de arrastre de fondo es realizado en forma sistemática en la estación fluviométrica utilizando un tomador de muestras de lecho "bed load sampler" tipo Helley-Smith. El caudal sólido de arrastre (g/s) se obtiene a partir del peso total de material de arrastre capturado en cada muestreo, dividido por el número de posiciones de muestreo en la sección (estas posiciones se corresponden con las de ubicación del molinete en los aforos y donde se obtienen las submuestras en los análisis para sedimentos en suspensión), dividido por el tiempo en cada posición de muestreo, dividido por el ancho de la boca del "bed load sampler" (0,15 metros) y multiplicado por el perímetro mojado al momento del muestreo. Se han estandarizado tanto el número de posiciones de muestreo (3) como el tiempo en cada posición de muestreo (20 segundos), para facilitar la operación en el campo y el análisis de los datos. El perímetro mojado se obtiene directamente ya que durante cada muestreo de arrastre de sedimentos de fondo se realiza un aforo para mejorar la relación entre Q-h. El caudal sólido de arrastre en cada campaña de muestreo resulta entonces:

$$QS_a = (PT * p) / (NPm * t * 0,15) \quad (2)$$

donde  $QS_a$  (g/s) es el caudal sólido de arrastre, PT (g) el peso total del material de arrastre capturado en cada muestreo, p (m) el perímetro mojado de la sección de aforo al momento del muestreo, NPm el número de posiciones de muestreo en cada ocasión (estandarizado en 3

posiciones),  $t$  (s) el tiempo de cada posición (estandarizado en 20 segundos por posición) y 0,15 (m) el ancho de la boca del "bed load sampler". Con un tiempo de 20 segundos por posición se completan 60 segundos de muestreo por aforo.

En general, la relación entre transporte o caudal sólido de arrastre y caudal líquido es del tipo ([Beschta 1987](#)):

$$QS_a = d Q^f \quad (3)$$

donde  $QS_a$ , tal como ya se ha definido, es el caudal sólido de arrastre expresado como masa por unidad de tiempo, y "d" y "f" son coeficientes determinados por regresión lineal de "log $QS_a$ " y "logQ".

Incorporando el concepto de caudal crítico ( $Q_{crit}$ ) o umbral de caudal a partir del cual el transporte de fondo se inicia, la ecuación anterior se modifica a ([Schoklisch 1962](#)):

$$QS_a = h (Q - Q_{crit})^j \quad (4)$$

donde "h" y "j" son coeficientes empíricos. El caudal crítico ( $Q_{crit}$ ) para el transporte de fondo, en general, y no para cada grano individual, está relacionado con características granulométricas del lecho y de la pendiente del cauce según la relación de Bathurst ([Bathurst 1987](#)), que expresa:

$$q_{crit} = Q_{crit}/w = 0,21 * i^{-1,12} * g^{0,5} * d_{16}^{1,5} \quad (5)$$

donde  $q_{crit}$  es el caudal crítico por unidad de ancho de la sección ( $q_{crit}$  en  $m^3/s/m$  o  $Q_{crit}/w$ , siendo  $w$  el ancho de la sección para  $Q = Q_{crit}$ ),  $g$  la aceleración de gravedad ( $m/s^2$ ),  $d_{16}$  (m) el tamaño para el cual el 16% del material del lecho tiene un diámetro inferior a  $d_{16}$ , e  $i$  la pendiente del lecho.

Finalmente, la relación entre  $w$  y  $Q$  para la sección de control obtenida de los datos de los aforos es:

$$w = 3,81 * Q^{0,21} \quad r^2 = 0,902 \quad (6)$$

donde  $w$  (m) es el ancho superficial del cauce al momento del aforo y  $Q$  ( $m^3/s$ ) el caudal aforado.

*Carga de sedimentos en la sección de control:* Según [Walling \(1977\)](#) y [Van-Sickle y Beschta \(1983\)](#) el empleo de las relaciones entre concentración de sedimentos en suspensión y caudal y caudal sólido de arrastre y caudal presentadas anteriormente puede generar algunos errores en el cálculo de la carga total de transporte de sedimentos. Sin embargo, de todos modos se utilizan con este propósito usando el método del balance parcial (modificado de [Probst 1986](#)):

$$CT = \sum C_i Q_i t_i + \sum Q S_{ai} t_i \quad (7)$$

siendo  $CT$  la carga de sedimentos para un período determinado de tiempo,  $C_i$  y  $Q_i$  la concentración 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  $QS_a$  el caudal sólido de arrastre medio de cada fase. El hidrograma de sedimentos se determina del hidrograma de caudales, integrándolo a continuación para intervalos de tiempo de 1 hora. La carga de sedimentos se cuantifica para un período de 40 meses, desde enero de 1998 hasta abril del 2001.

*Categorización de la cuenca en función de las características del transporte de sólidos:* La

cuenca de estudio se clasifica según el tipo de transporte sólido siguiendo a [Aulitzky \(1982\)](#), quien propone las siguientes categorías: crecidas con bajo potencial de transporte de sólidos y con prevalencia de sedimentos finos en suspensión (flood creek), crecidas torrenciales con gran transporte de fondo (bed load), corrientes con alta concentración de sedimentos pero aún con características de fluido newtoniano (debris flood) y coladas de detritos con condiciones de fluidos no newtonianos (debris flow).

Para Marchi *et al.* (1993), las cuencas con riesgo de debris flow o debris flood se caracterizan por un valor del Índice de Melton superior a 0,5. El Índice de Melton (D'Agostino s.f.) es:

$$Me = (H_{\text{máx}} - H_{\text{mín}}) * S^{-0,5} \quad (8)$$

donde  $H_{\text{máx}}$  y  $H_{\text{mín}}$  (km) son la altura máxima y mínima de la cuenca y  $S$  (km<sup>2</sup>) la superficie de la misma.

## RESULTADOS

*Transporte de sedimentos en suspensión:* Los datos de campo de las campañas para la investigación sobre transporte de sedimentos en suspensión están en el [cuadro 2](#). Aquí aparece para cada aforo el caudal ( $Q$ , m<sup>3</sup>/s) al momento del muestreo y la concentración de sedimentos en suspensión ( $C$ , mg/l).

CUADRO 2

Detalle de los aforos de sedimentos en suspensión en el estero Tres Arroyos.  
Details of the suspended-sediment field data collection campaign.

Campaña de aforo	Caudal al momento del muestreo $Q$ (m <sup>3</sup> /s)	Concentración de sedimentos en suspensión $C$ (mg/l)
30-09-98	0,262	3,2
29-11-98	0,161	2,3
22-12-98	0,151	1,9
13-01-99	0,103	1,8
02-10-99	0,110	2,6
03-12-99	0,089	1,9
16-04-99	0,091	1,4
16-05-99	0,393	3,4
30-05-99	0,195	2,3
07-06-99	0,434	1,7
24-07-99	0,256	1,5
29-07-99	0,248	2,0
04-08-99	0,504	1,4
05-08-99	0,697	9,8
05-08-99	0,582	3,0
05-08-99	0,548	3,6
06-08-99	0,385	2,0
10-08-99	1,504	14,3
11-08-99	1,079	6,4
15-08-99	0,804	2,1
18-08-99	0,955	52,5
19-08-99	1,002	8,5
17-09-99	0,719	2,5

17-10-99	0,505	26,2
23-10-99	0,998	24,3
10-11-99	0,505	2,0
03-12-99	0,262	5,5
03-12-99	0,262	11,6
18-12-99	0,344	3,3
09-01-00	0,238	3,4
28-01-00	0,195	2,0
13-02-00	0,505	5,0
27-02-00	0,505	9,0
17-03-00	0,211	3,7
17-03-00	0,262	0,7
29-07-00	0,437	2,7
06-08-00	0,692	5,8
06-08-00	0,986	50,5
06-08-00	1,213	100,8
06-08-00	1,481	77,7
13-08-00	0,560	1,8
28-08-00	0,540	2,7

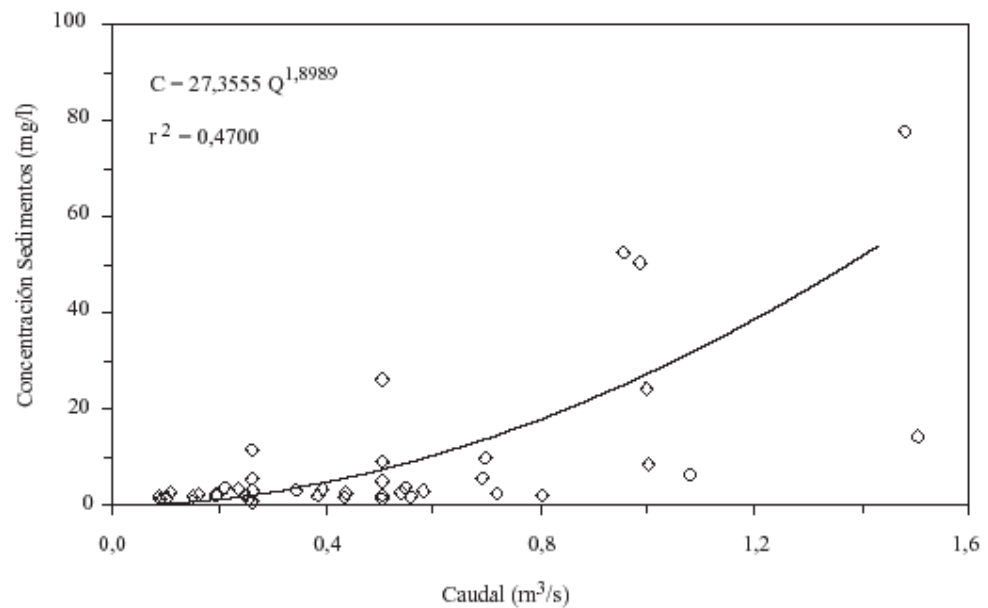
Destacan en estos resultados las bajas concentraciones de los sedimentos en suspensión, que, como se puede apreciar del [cuadro 2](#), varían entre 0,7 y 100,8 mg/l. Estos niveles de concentración de sedimentos se explicarían por el hecho de que gran parte de la cuenca de control está cubierta con bosque, pero principalmente por las elevadas tasas de infiltración que presentan los suelos arenosos del área de estudio, donde se alcanzan valores de entre 25 y 400 cm/h ([Dirección General de Aguas 2000](#)).

En una cuenca parcialmente forestada cercana a Valdivia, para el período diciembre 1983 a noviembre 1984, con una precipitación total de 2.170 mm/año, las concentraciones de los sedimentos en suspensión variaron entre 14 y 186 mg/l ([Iroumé 1990](#)). Para la misma cuenca, entre agosto 1988 a julio 1989, con una precipitación de 1.647 mm/año, las concentraciones fluctuaron entre 0,6 y 547 mg/l (Iroumé 1992). En una cuenca con una cubierta total de bosques en la Cordillera de los Andes, cercana a Osorno, para el período abril 1997 a marzo 1998, con una precipitación total de 3.052 mm/año, las concentraciones variaron entre 64 y 1.529 mg/l ([Menke 1999](#)). Estas dos cuencas tienen suelos rojo-arcillosos, los que por textura y capacidad de infiltración favorecen los escurrimientos superficiales y el transporte del material fino en la forma de suspensiones. Es necesario destacar que estas cuencas no habían sido sometidas a intervenciones forestales durante los años previos a las mediciones.

Gráficamente, la relación entre la concentración de sedimentos en suspensión (C) y el caudal al momento del muestreo (Q) es como se muestra en la [figura 1](#). Para esta investigación, la relación entre C y Q tiene la expresión:

$$C \text{ (mg/l)} = 27,36 Q \text{ (m}^3\text{/s)}^{1,899} \quad (r^2 = 0,47) \quad (9)$$





*Figura 1.* Relación entre concentración de sedimentos en suspensión y caudal al momento del muestreo.

Relationship between suspended sediment concentration and discharge.

*Transporte de sedimentos de arrastre de fondo:* Los datos de campo de las campañas para la investigación sobre transporte de sedimentos de fondo están en el [cuadro 3](#), donde para cada muestreo se indican los caudales aforados tanto líquidos (Q, m<sup>3</sup>/s) como sólidos (QS<sub>a</sub>, g/s).

CUADRO 3

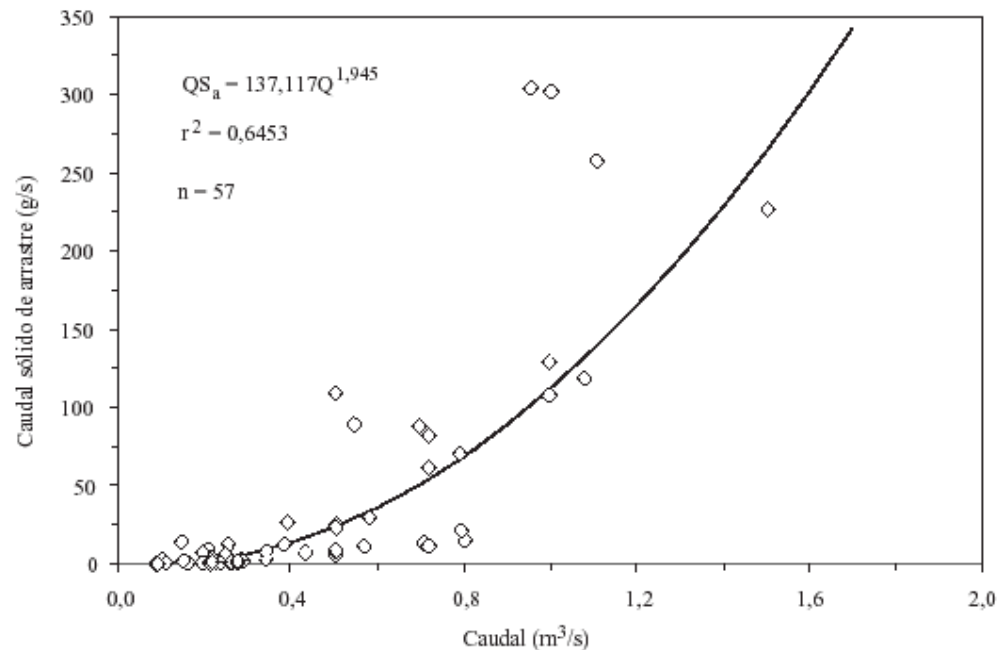
Antecedentes de los muestreos de arrastre de fondo.  
Bed-load transport data.

Fecha	Caudal Q (m <sup>3</sup> /s)	Caudal sólido de arrastre QS <sub>a</sub> (g/s)
31-10-97	0,791	70,69
26-11-97	0,707	13,25
29-05-98	0,207	9,23
19-06-98	0,196	7,63
06-08-98	0,146	14,11
20-08-98	0,216	3,64
28-09-98	0,287	2,92
21-10-98	0,289	1,61
29-11-98	0,161	0,22
22-12-98	0,151	1,96
13-01-99	0,103	2,43
10-02-99	0,110	0,25
12-03-99	0,089	0,00
16-04-99	0,091	0,15
16-05-99	0,393	26,37

06-07-99	0,434	6,90
24-07-99	0,256	12,19
29-07-99	0,248	5,67
04-08-99	0,504	25,02
05-08-99	0,697	88,21
05-08-99	0,582	28,81
05-08-99	0,547	88,80
06-08-99	0,385	12,10
10-08-99	1,504	226,44
11-08-99	1,079	118,38
15-08-99	0,804	14,67
18-08-99	0,793	21,08
18-08-99	0,954	304,07
18-08-99	1,107	257,69
19-08-99	1,002	301,94
17-09-99	0,719	11,28
17-10-99	0,505	5,21
23-10-99	0,998	128,87
23-10-99	0,998	107,69
10-11-99	0,505	7,64
10-11-99	0,570	11,06
03-12-99	0,262	0,97
03-12-99	0,262	1,40
18-12-99	0,344	2,57
18-12-99	0,344	8,06
09-01-00	0,227	0,90
09-01-00	0,238	0,31
28-01-00	0,195	0,62
13-02-00	0,505	8,38
27-02-00	0,505	22,88
27-02-00	0,505	108,49
17-03-00	0,211	0,21
17-03-00	0,262	0,30
01-04-00	0,219	0,78
01-04-00	0,219	0,68
26-04-00	0,262	0,40
12-05-00	0,262	0,23
12-05-00	0,262	0,80
27-05-00	0,277	0,44
27-05-00	0,277	1,22
10-06-00	0,719	61,35
10-06-00	0,719	81,72

Gráficamente, la relación entre caudal sólido de arrastre y caudal al momento del muestreo se puede apreciar en la [figura 2](#). Para esta investigación, entre caudal sólido de arrastre ( $QS_a$  en g/s) y caudal al momento del muestreo ( $Q$  en  $m^3/s$ ) se desarrolla la siguiente expresión matemática:

$$QS_a = 137,12 Q^{1,95} \quad (r^2 = 0,6453) \quad (10)$$



*Figura 2.* Relación entre caudal sólido de arrastre y caudal al momento del muestreo.

Relationship between bed-load transport and discharge.

Para incorporar en esta relación el caudal crítico ( $Q_{crit}$ ) o umbral de caudal a partir del cual el transporte de fondo se inicia, es necesario calcular el valor de  $Q_{crit}$ .

Como primera aproximación, es posible obtener  $Q_{crit}$  de los aforos del caudal sólido de arrastre que se presentan en el [cuadro 3](#). El día 12/3/ 99 se registró un caudal ( $Q$ ) de  $0,089 \text{ m}^3/\text{s}$  junto a un caudal sólido de arrastre ( $QS_a$ ) de  $0 \text{ g/s}$ . En los aforos del 12/2/99 y del 16/4/99 se registró un  $Q$  de  $0,11$  y  $0,091 \text{ m}^3/\text{s}$  y un  $QS_a$  de  $0,246$  y  $0,905 \text{ g/s}$ , respectivamente. Es posible asumir con esta información que el caudal crítico debe estar entre estos valores, pudiendo definirse  $Q_{crit}$  en  $0,089 \text{ m}^3/\text{s}$  como primera aproximación.

El valor  $Q_{crit}$  se puede obtener también a partir de la fórmula de Bathurst conocidos la pendiente del lecho  $i$ ,  $d_{16}$  de la granulometría de la superficie del lecho en la sección y la relación entre  $w$  y  $Q$  para la sección de aforo. Ya se mencionó que la pendiente del lecho es  $3,5\%$  y que el valor de  $d_{16}$  es  $0,013$  metros, por lo que el lado derecho de la ecuación reordenada de Bathurst queda:

$$\begin{aligned}
 0,21 * i^{-1,12} * g^{0,5} * d_{16}^{1,5} &= 0,21 * \\
 (3,5/100)^{-1,12} * 9,81^{0,5} * 0,013^{1,5} &= \\
 0,0416 \text{ m}^3/\text{s/m} &
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Este valor de  $0,0416 \text{ m}^3/\text{s/m}$  corresponde a  $q_{crit} = Q_{crit}/w$  y usando la relación entre  $w$  y  $Q$  generada con los datos de los aforos tal como muestra la ecuación (6), se obtiene una segunda aproximación para  $Q_{crit}$  de  $0,0875 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Entre los dos valores para  $Q_{crit}$  ( $0,089$  y  $0,0875 \text{ m}^3/\text{s}$ ), que resultan muy similares, se decide por el más conservador, fijándose para la sección de control del estero Tres Arroyos un caudal

crítico o umbral de caudal a partir del cual se inicia el transporte de fondo de 0,0875 m<sup>3</sup>/s. Incorporando este valor para Q<sub>crit</sub> en la relación entre QS<sub>a</sub> (g/s) y Q (m<sup>3</sup>/s), la expresión queda:

$$QS_a = 138,18 (Q - Q_{crit})^{1,93} = 138,18 (Q - 0,0875)^{1,93}$$

$$(r^2 = 0,6463) \quad (12)$$

Se puede apreciar que las ecuaciones (10) y (12) son muy similares, y que no se genera una mejoría importante en la estadística al incorporar el caudal crítico en la relación entre caudal sólido de arrastre y caudal al momento del muestreo.

*Carga total de sedimentos:* Usando la ecuación del método del balance parcial modificada de Probst (1986) y las expresiones matemáticas de las relaciones entre concentración de sedimentos en suspensión (C) y caudal al momento del muestreo (Q) y entre caudal sólido de arrastre (QS<sub>a</sub>) y Q determinados durante esta investigación, se calcula la carga total de sedimentos transportados por mes para el período de duración del estudio, [cuadro 4](#).

Para los 40 meses de registro de caudales, la carga total de sedimentos en suspensión es de 1.660 toneladas, la de arrastre de fondo de 4.720 toneladas y el transporte total de sedimentos de poco más de 6.381 toneladas. Es decir, en la carga total los sedimentos en suspensión participan con el 26%, mientras que los acarreo o arrastre de fondo con el 74% restante. Esto difiere de resultados encontrados en cuencas forestadas en suelos arcillosos de la Décima Región, donde los arrastres de fondo fueron insignificantes comparados con el transporte en suspensión ([Iroumé 1990, 1992, Menke 1999](#)).

Considerando que la superficie de la cuenca de control es de 592,8 ha (5,928 km<sup>2</sup>), se puede estimar que la degradación específica anual en el estero Tres Arroyos es del orden de 323 t/km<sup>2</sup>/año (6.381/40\*12/5,928). Sin embargo, se presentan con grandes variaciones de un año a otro, ya que para el año 1998 el transporte total es 48 t/km<sup>2</sup>/año (283/5.928) y para el año 2000 de 700 t/km<sup>2</sup>/año (4.151/5,928). Estas variaciones interanuales se explican por la fuerte incidencia que tiene en el transporte de sedimentos la ocurrencia de eventos de magnitud relevante. Por ejemplo, del [cuadro 4](#) se puede apreciar que las 1.589 toneladas transportadas en el mes de julio del 2000 (un mes con una gran cantidad de eventos importantes y con un caudal medio mensual de 1,35 m<sup>3</sup>/s, con mucho el más alto de todos los meses del período de estudio), corresponden al 25% del transporte total de sedimentos durante el período de duración de la investigación, que es de 40 meses.

La gran incidencia que tiene el transporte de fondo en la carga total de sedimentos que se ha cuantificado y las altas tasas de infiltración que presentan los suelos arenosos del área de estudio, que tienden a favorecer los escurrimientos subsuperficiales en detrimento de los superficiales, cuestión que reduce los procesos erosivos de superficie en las laderas, parece sugerir que los principales cambios geomorfológicos que podrían esperarse en la red de drenaje de la cuenca del estero Tres Arroyos deberían estar asociados a fenómenos de crecidas torrenciales con gran transporte de fondo (bed load), o con corrientes con alta concentración de sedimentos pero aún con características de fluido newtoniano (debris flood) o, por último, con coladas de detritos (debris flow), según la clasificación de [Aulitzky \(1982\)](#).

Obteniendo del [cuadro 1](#) los valores de H<sub>máx</sub> (1,856 km), H<sub>mín</sub> (1,095 km) y S (5,928 km<sup>2</sup>) para la sección de control del estero Tres Arroyos, el Índice de Melton resulta 0,313. Con esto, la cuenca del estero Tres Arroyos, hacia aguas arriba de la sección de control, se comporta más bien como un torrente del tipo "bed load" y presenta un menor riesgo de debris flow y/o debris flood.

Analizando las fotografías aéreas de los años 1973 y 1994, disponibles para la cuenca, no se detecta ocurrencia de aluviones aguas arriba de la sección de control. Sin embargo, en la

misma cuenca se produjeron al menos dos aluviones que se generaron de un par de quebradas localizadas hacia aguas abajo de la sección de control, cuestión que será presentada en futuros informes.

## CONCLUSIONES

Para la cuenca estudiada, los acarreos o arrastre de fondo participan con el 74% de la carga total, mientras que los sedimentos en suspensión contribuyen con el 26% restante. Esto difiere de resultados encontrados en cuencas forestadas en suelos arcillosos de la Décima Región, donde los arrastres de fondo fueron insignificantes comparados con el transporte en suspensión.

CUADRO 4

Carga total de sedimentos transportados en suspensión y en acarreos.  
Total suspended and bed-load sediment transport.

Año	Mes	Caudal medio	Carga de sedimentos		
		(m <sup>3</sup> /s)	Suspensión (t)	Acarreos (t)	Total (t)
1998	1	0,125	0,72	11,72	12,44
	2	0,141	0,24	7,45	7,69
	3	0,145	0,30	8,78	9,08
	4	0,188	0,67	14,49	15,16
	5	0,182	0,58	13,81	14,40
	6	0,180	0,56	13,10	13,66
	7	0,251	1,85	27,57	29,42
	8	0,251	3,48	31,28	34,76
	9	0,257	1,46	25,72	27,18
	10	0,296	2,19	34,63	36,82
	11	0,225	1,25	20,93	22,18
	12	0,218	16,24	44,60	60,84
Total 1998		0,205	29,54	254,08	283,62
1999	1	0,162	0,59	11,84	12,44
	2	0,129	0,30	7,33	7,63
	3	0,165	0,54	12,38	12,92
	4	0,122	0,40	8,37	8,77
	5	0,237	2,48	27,60	30,08
	6	0,450	23,77	120,27	144,04
	7	0,345	3,85	48,32	52,17
	8	0,962	136,13	429,12	565,26
	9	0,893	54,58	290,92	345,50
	10	0,833	44,14	259,50	303,64
	11	0,504	13,89	106,40	120,29
	12	0,265	1,78	28,76	30,54
Total 1999		0,424	282,48	1.350,80	1.633,28

2000	1	0,208	0,82	17,67	18,50
	2	0,399	7,11	66,35	73,46
	3	0,322	4,04	46,99	51,03
	4	0,253	3,59	35,64	39,23
	5	0,369	5,98	60,77	66,75
	6	1,210	604,21	883,76	1.487,97
	7	1,351	574,17	1.014,89	1.589,06
	8	0,545	16,27	120,33	136,61
	9	0,627	19,15	145,55	164,70
	10	0,838	47,70	267,70	315,41
	11	0,445	15,71	102,79	118,50
	12	0,418	9,52	81,04	90,56
Total 2000		0,583	1.308,29	2.843,47	4.151,76
2001	1	0,366	8,51	67,38	75,89
	2	0,200	0,86	16,02	16,88
	3	0,234	1,81	26,57	28,38
	4	0,536	29,27	162,32	191,59
Total 2001		0,336	40,45	272,29	312,74
Total general		0,397	1.660,75	4.720,65	6.381,41

Esta característica del proceso de transporte de sedimentos concuerda con la clasificación de Aulitzky, la cual basada en un Índice de Melton de 0,313 muestra que la cuenca del estero Tres Arroyos, hacia aguas arriba de la sección de control, se comporta más bien como un torrente del tipo "transporte de fondo" y presenta un menor riesgo de movimientos de grandes masas o aluviones.

Sin embargo, el tipo de transporte de sedimentos y las condiciones de suelo y topográficas de la cuenca estudiada, parecen sugerir que los principales cambios geomorfológicos que podrían esperarse en la red de drenaje deberían estar asociados a fenómenos de crecidas torrenciales con gran transporte de fondo o con corrientes con alta concentración de sedimentos.

## BIBLIOGRAFIA

AULITZKY, H. 1982. "Preliminary two-fold classification of torrents", Mitteil. der Forst. Bundesversuchsanstalt, Heft 144: 243-256.

BATHURST, J. C. 1987. "Critical conditions for bed material movement in steep, boulder-bed streams". En: Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim, Proceedings of the Corvallis Symposium, IAHS Publ. N°165, pp: 309-318.

BESCHTA, R. L. 1987. "Conceptual models of sediment transport in streams". En: THORNE, C. R., J. C. BATHURST y R. D. HEY (ed.). Sediment Transport in Gravel-bed Rivers. John Wiley & Sons Ltd., pp: 387-419.

BOGARDI, J. 1978. Sediment transport in alluvial streams. Akadémiai Kiadó, Budapest. 825 p.

D'AGOSTINO, V. "s.f.". Análisi quantitativa e qualitativa del trasporto solido torrentizio nei bacini montani del Trentino Orientale. Dipartimento Territorio e Sistemi Agroforestali, AGRIPOLIS, Università di Padova,

DIRECCION GENERAL DE AGUAS. 2000. Cuenca experimental representativa, Reserva Forestal Malalcahuello, cuenca Río Imperial, IX Región de la Araucanía. Informe Final S.I.T. N°68, Convenio Dirección General de Aguas-Universidad Austral de Chile, Facultad de

Ciencias Forestales, Valdivia. Volumen 1, 116 p; Volumen 2, 196 p.

IROUME, A. 1990. "Assessment of runoff and suspended sediment yield in a partially forested catchment in Southern Chile", *Water Resources Research* 26(11): 2637-2642.

IROUME, A. 1992. "Precipitación, escorrentía y producción de sedimentos en suspensión en una cuenca cercana a Valdivia, Chile", *Bosque* 13(2): 15-23.

IROUME, A. 1997. "Estudio de los procesos hidrológicos en una cuenca experimental forestal andina de la IX Región, Chile", *Bosque* 18(1): 73-81.

LOOTENS, M., S. LUMBU. 1986. "Suspended sediment production in a suburban tropical basin (Lubumbashi, Zaire)", *Hydrological Sciences Journal* 31(1): 39-49.

MARCHI, L., G. TRISORIO-LIUZZI, P. ZANFRAMUNDO. 1986. "Analisi dei deflussi torbidi nei piccoli bacini del Sub-Appennino Dauno", *Quaderni Idronomia Montana* 6: 95-121.

MARTINEZ, R., J. M. GARCIA. 1990. "Coladas de piedra y barro y dinámica fluvial en ríos torrenciales del Pirineo Central: El caso del Río Ijuez", *Cuadernos de Investigación Geográfica* 16(1): 55-72.

MENKE, C. 1999. Transporte de sedimentos en una cuenca de la Décima Región. Tesis Ingeniería Forestal, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, Valdivia, 68 p.

OYARZUN, C. 1993. "Evaluación del modelo U.S.L.E. para predecir pérdidas de suelo en áreas forestadas de la cuenca del río Bío-Bío", *Bosque* 14(1): 45-54.

PROBST, J. L. 1986. "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): 61-79.

PROBST, J. L., A. BEZARBACHI. 1986. "Transports en solution et en suspension par la Garonne Supérieure", *Sci. Géol. Bull. Strasbourg* 39(1): 79-98.

RIVAS, J. 2000. Erosión hídrica y parámetros físico-químicos del escurrimiento superficial en plantaciones forestales. Tesis Ingeniería Forestal, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, Valdivia, 85 p.

SCHOKTLISCH, A. 1962. *Handbuch des Wasserbaues*. 3rd ed., Springer-Verlag, Viena.

SCHULZ, K. 2000. Tesis Ingeniería Forestal, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, Valdivia, 68 p.

SIDLE, R. 1980. Slope stability on forest land. USDA Forest Service, Pacific Northwest Extension Publication, PNW209. 23 p.

SIMONS, D. B. y F. SENTÜRK. 1977. Sediment transport technology. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, USA. 807 p.

STOLZENBACH, C. 1998. Generación de caudales y cuantificación de pérdidas de suelo en suelos rojo arcillosos de la provincia de Valdivia, X Región. Tesis Ingeniería Forestal, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, Valdivia, 84 p.

VAN-SIKLE, J., R. L. BESCHTA. 1983. "Supply-based models of suspended sediment transport in streams", *Water Resources Research* 19(3): 768-778.

VANDINE, D. 1996. Debris control structures for forest engineering. Res. Br., B.C. Min For. Victoria, B.C., Work. 75 p.

WALLING, D. E. 1977. "Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin", Water Resources Research 13(3): 531-538.

WOLMAN, M.G. 1954. "A method of sampling coarse riverbed material", Trans. Am. Geophys. Union 35: 951-956.

Recibido: 09.04.2002  
Aceptado: 08.08.2002