



ESTUDIO DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN EN RELACIÓN CON EL CAUDAL Y LA CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTO EN UNA CUENCA DE MONTAÑA

Study of suspended particle size in relation with discharge and sediment concentration in a mountain catchment

M. Soler ⁽¹⁾, D. Regüés ⁽²⁾ y F. Gallart ⁽¹⁾

(1) Instituto Ciencias de la Tierra "Jaume Almera" (CSIC). C/ Solé Sabarís, s/n. 08028 Barcelona.

(2) Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC). Av. Montañana 1005. 50059 Zaragoza.

E-mail msoler@ija.csic.es Fax: 934110012

Resumen: Se presentan los resultados del muestreo automático del sedimento transportado en suspensión en tres estaciones de aforo instaladas en las cuencas experimentales de Vallcebre (Pirineo Oriental). Este trabajo analiza el tamaño de las partículas de sedimento recogidas por los muestreadores en tres de las estaciones del año (primavera, verano y otoño). Las máximas concentraciones de sedimento observadas han llegado a superar los 100 g l⁻¹. Los sedimentos transportados son mayoritariamente limo fino, con porcentajes bajos de arcilla y muy bajos de arena fina. Se han encontrado correlaciones positivas entre el tamaño de las partículas y el caudal en los respectivos aforadores mientras que la relación entre el tamaño de las partículas y la concentración de sedimentos sólo es significativa en la cuenca principal. En esta zona de cabecera, la fuente del material de origen es la que determina el tamaño de las partículas transportadas, aunque los procesos de transporte, sedimentación y re-erosión producen su desgaste y fraccionamiento.

Palabras clave: sedimento en suspensión, tamaño de las partículas, concentración de sedimento, caudal.

Abstract: This study shows presents the dynamics of suspended sediment transport at the the results of suspended sediment sampling at three gauging stations in the Vallcebre experimental basins (Eastern Pyrenees). The paper analyses particle size distribution of the automatically collected sediment samples during three seasons: The work analyses particle size characteristics of sediments collected by three automatic samplers in different seasons (spring, summer and autumn). Highest Peak suspended solids concentrations measured exceeded 100 g l⁻¹. Texture of The transported sediments consist consisted mainly of fine silt, with low percentages of clay and very low fractions of fine sand. PPositive correlationss werewere found between particle size and water discharge, whereas correlations between particle size and sediment concentration were only were hardly significant in one of the catchment. In the study area, the particle size of transported suspended sediments, largely depends on the lithological material of the catchments. However, hydrological this headwaters area, the original material source is the main control of the particle size in suspended sediments transported by streams, although the transport processes, deposition and re-erosion phenomena, produced their the fractioningfractioning and erosion of particles.

Keywords: suspended sediment, particle size, sediment concentration, discharge.



M. Soler, D. Regüés & F. Gallart (2003) Estudio del tamaño de las partículas en suspensión en relación con el caudal y la concentración de sedimento en una cuenca de montaña. *Rev. C. & G.*, 17 (3-4), 69-77.

1. Introducción

La concentración de partículas de sedimento en suspensión que puede transportar un curso fluvial está en relación con la velocidad, profundidad, pendiente y rugosidad del canal (Leopold y Maddock, 1953). Por otro lado, el tamaño de las partículas transportadas también depende de dichos factores y, en consecuencia la concentración y los tamaños de grano suelen estar relacionados entre sí (Reid y Frostick, 1987). Asimismo, el transporte y deposición de sedimentos en sistemas fluviales es selectivo, de manera que la sedimentación de las partículas más gruesas predomina en los tramos medios y altos, mientras que las partículas más finas pueden ser transportadas en suspensión hasta la desembocadura de los cursos fluviales (Walling *et al.*, 2000).

Los estudios sobre exportación fluvial de sedimentos en suspensión se utilizan para estimar tasas de erosión en cuencas de drenaje (Walling y Webb, 1987) además pueden proporcionar información sobre la localización de las áreas fuente, determinar las pautas de la dinámica de sedimentos y formular hipótesis sobre su efecto geomorfológico aguas abajo. Desde un punto de vista técnico, esta información puede ser valiosa tanto para la explotación de áridos, como para aplicaciones de ingeniería civil: procesos de colmatación y vida de los embalses, o construcción de puentes (Batalla y Sala, 1994).

Los últimos estudios sobre transporte en suspensión se centran en los efectos perjudiciales que puede aportar el sedimento en suspensión en los sistemas fluviales, y en la importancia del transporte de contaminantes, así como la difusión del origen de la contaminación. Esto ha comportado una mayor atención a los controles de sedimento en las cuencas fluviales (Russell *et al.*, 2001).

El objetivo de este trabajo es analizar las relaciones existentes entre el tamaño de las partículas en suspensión, la concentración del sedimento y el caudal durante las crecidas en tres torrentes situados en Vallcebre (Alt Berguedà, Pirineos Orientales). De manera complementaria se aportan datos sobre la distribución estacional del transporte de sedimento y su relación con las áreas fuente en las cuencas. En las cuencas de Vallcebre ya se ha realizado una primera evaluación del transporte del sedimento, sus fuentes y el efecto de la dinámica

estacional de las cárcavas como aporte de material a la red de drenaje (Castelltort 1995, Balasch 1998, Regüés *et al.*, 2000) pero todavía no se había abordado el estudio de las características granulométricas de los sedimentos.

2. Area de estudio

La cuenca de Vallcebre (19,6 km²) está ubicada en el sector sudoriental de los Pirineos, en la cabecera del río Llobregat a unos 900 m s.n.m. La precipitación media anual es de 925 mm y la temperatura media anual de 9°C. No obstante, su principal característica está definida por una acentuada estacionalidad climática. Las estaciones húmedas comprenden la primavera y el otoño con una precipitación generalmente homogénea. Las estaciones secas incluyen el invierno con precipitaciones escasas que suelen ser en forma de nieve, y el verano que suele presentar una etapa de déficit hídrico originado más por las temperaturas relativamente elevadas que por la falta de precipitación. El verano suele finalizar con un periodo de tormentas consecutivas de corta duración y alta intensidad. (Regüés *et al.*, 2000).

Geológicamente, la cuenca de Vallcebre se sitúa sobre un substrato Paleoceno constituido por calizas y arcillas continentales de facies denominada "Garumniense" (Aepler, 1968) asignada a la Formación Tremp (Feist y Colombo, 1983). En cuanto a su estructura, la cuenca constituye una cubeta con forma de cono invertido como consecuencia de la intersección de dos sistemas sinclinales (Solé *et al.*, 1992).

La cuenca ha sufrido modificaciones antrópicas a lo largo del último siglo. Las actividades económicas principales son la ganadería, la agricultura y la minería del carbón. En el pasado se aterraron para el cultivo la mayor parte de las vertientes, sobre todo en las solanas. Durante la segunda mitad del siglo XX estos campos de cultivo han sido abandonados. Esto, junto a las características climáticas y geológicas han llevado a esta cuenca a tener geosistemas diversos de reducida extensión (bosques, prados, terrazas, campos abandonados, áreas de cárcavas) que la convierten en un emplazamiento óptimo para el desarrollo de estudios geomorfológicos.

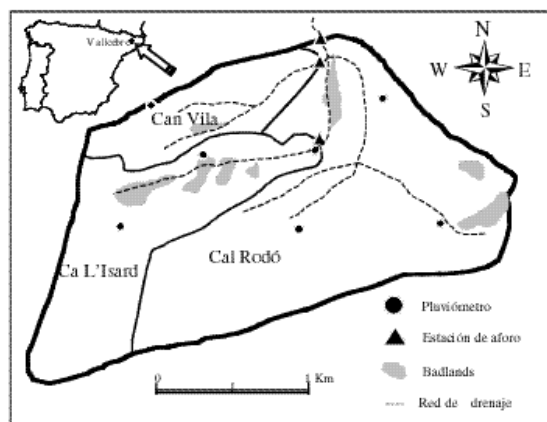


Figura 1. Mapa de las cuencas de Vallcebre, su localización e instrumentación.

Figure 1. Map of the Vallcebre catchments, showing the location of the instruments.

3. Metodología

La instrumentación de las cuencas consta de tres estaciones de aforo equipadas y ubicadas jerárquicamente dentro la red de drenaje: Can Vila, Ca l'Isard y Cal Rodó (Fig. 1). En la tabla 1 se puede observar la caracterización de los torrentes estudiados, utilizando datos que corresponden a los valores medios de los últimos siete años. Las principales características de estas cuencas son las siguientes:

- Can Vila (56,0 ha): Subcuenca vegetada con predominio de campos abandonados y bosque. La estación de aforo consta de un sensor de nivel, un sensor de turbidez de infrarrojos y un muestreador automático desde 1996.
- Ca L'Isard (131,7 ha): Subcuenca donde predominan los bosques, terrazas, campos abandonados y cárcavas. La estación de aforo está equipada desde 1990 con un sensor de nivel y un muestreador automático, y a partir 1994 con un sensor de turbidez de infrarrojos y un sensor de sólidos en suspensión por ultrasonidos (Fig. 2).
- Cal Rodó (417,4 ha): Abarca las dos anteriores. En el punto de salida de la red de drenaje se dispone de una estación de aforo con un equipamiento similar al de Ca L'Isard.



Figura 2. Fotografía de la estación de aforo de Ca L'Isard.
Figure 2. Photography of the Ca l'Isard gauging station.
(Foto: J. Latron).

Las muestras se recogen con muestreadores automáticos modelo ISCO 2700 de 24 botellas de 1 litro de capacidad que están conectados a los colectores de datos. Las bocas de los muestreadores están situadas aproximadamente a un metro del margen y su altura con relación al fondo del lecho del torrente varía según la cantidad de material depositado por la crecida anterior, pudiendo variar de 0 a 20 cm. Las bocas de muestreo, así como los sensores de sedimentos, están colocados en puntos de elevada turbulencia donde las variaciones vertical y lateral del sedimento en suspensión pueden considerarse despreciables en comparación con la variación temporal. Cada vez que se produce una crecida por encima de niveles predeterminados anteriormente se disparan los muestreadores, recogiendo el agua con material en suspensión a intervalos de tiempo variables (mínimo de dos minutos) programados según criterio de experiencias anteriores. Los niveles de disparo no son fijos a lo largo del año sino que se modifican en función del caudal entre crecidas. Recíprocamente, los colectores

Tabla 1. Características hidrológicas de las tres cuencas aforadas.
Table 1. Hydrological characteristics for the three gauged catchments.

	Cal Rodó	Ca l'Isard	Can Vila
Superficie (ha)	417,4	131,7	56,0
Desnivel (m)	542	461	210
Longitud (km)	2,5	1,7	1,1
Escorrentía (mm)	346,1	245,9	318,9
Coefficiente de escorrentía (%)	39,1	26,9	32,9
Concentración sedimento suspensión ($g l^{-1}$)	7,3	12,5	0,5
Concentración máxima ($g l^{-1}$)	103,0	174,4	5,9
Exportación disuelta ($Mg ha^{-1} a^{-1}$)	3,4	3,5	3,3
Exportación en suspensión ($Mg ha^{-1} a^{-1}$)	5,3	23,9	0,1

de datos registran los momentos de muestreo juntamente con diversas variables que incluyen nivel, temperatura, turbidez y atenuación de ultrasonidos.

Para la determinación del diámetro de las partículas del sedimento recogido en las botellas y del lecho de los torrentes se ha utilizado un equipo por dispersión de haz láser Malvern Mastersizer/E, con un rango de medición de 0,5 μm a 600 μm . Las muestras no han sufrido ningún tratamiento (dispersión), ya que nos interesan las condiciones de transporte y asumimos que han sido transportadas como se encuentran en las botellas. Para verificar las posibles diferencias se realizó un análisis textural con seis muestras, tres de las cuales fueron dispersadas con hexametáfosfato sódico mientras las otras tres no fueron dispersadas. La distribución granulométrica obtenida por el analizador de partículas, para estas seis muestras ha sido prácticamente la misma, lo que indica que la fracción más fina no se transporta como agregados dispersables.

El análisis de las partículas en suspensión se ha realizado inmediatamente después de la recogida de la muestra, para evitar problemas originados por la inestabilidad tanto de las partículas orgánicas como inorgánicas, así como para evitar en la medida de lo posible los procesos de floculación, oxidación y formación de moho (Fontolan y Grenni, 1995).

Un total de 72 muestras, pertenecientes a 18 crecidas, han pasado por el analizador de partículas. De Cal Rodó se han analizado 42 muestras que corresponden a siete avenidas: tres en otoño y cuatro en verano. De Ca l'Isard las muestras analizadas han sido 18 correspondientes a cinco crecidas: tres en verano y otras dos en primavera. En Can Vila también se han tomado 12 muestras obtenidas en dos avenidas de otoño, tres de primavera y una de verano. Todas las muestras pertenecen bien al otoño o primavera, estación húmeda, o al verano, época seca pero con fuertes lluvias torrenciales. También se han tomado cuatro muestras del lecho de Cal Rodó para determinar la textura del lecho.

Para la clasificación del tamaño de las partículas se ha seguido la determinada por la USDA (Soil Survey Staff, 1975). Se han utilizado como referencia los diámetros de tamiz por los que pasaría el 10, 50 y 90% de la muestra, denominados respectivamente D_{10} , D_{50} y D_{90} . Antes de pasar las muestras por el analizador láser se tamizaron con un tamiz de 500 μm de luz, para separar la arena media y gruesa de los materiales más finos. No obstante, nunca se encontraron

partículas superiores a este diámetro dentro de las botellas de los muestreadores. El mismo efecto se obtuvo experimentalmente en el laboratorio cuando se realizaban pruebas para la calibración de los sensores de ultrasonidos: se introdujo sedimento recogido de los cauces en un recipiente y se removió con un agitador mecánico, posteriormente se recogían muestras manualmente y se pasaban por el analizador de partículas; tampoco las partículas superaron las 500 μm de diámetro (Regüés et al., 2002). De esta manera, el material obtenido fue analizado en su totalidad.

Para determinar la significación de los resultados obtenidos se han utilizado las pruebas de Student y de Análisis de Varianza, tomando como umbrales las probabilidades de 0,01 y 0,05 de la hipótesis nula.

4. Resultados

Las muestras recogidas por el muestreador automático presentan concentraciones de sedimento moderadas para Can Vila (media = 0,7 g l^{-1}), muy elevadas para Cal Rodó (media = 22 g l^{-1}), y extremadamente elevadas para Ca l'Isard (media = 25 g l^{-1}).

4.1. Tamaño de las partículas en cada una de las áreas de estudio

La granulometría del lecho de los torrentes varía temporalmente según el material transportado y depositado en la última crecida; sobre los materiales de carga de fondo (gravas y bloques principalmente) algunas crecidas suelen depositar acumulaciones más o menos discontinuas de materiales finos, que pueden desaparecer en su práctica totalidad en crecidas posteriores. Una determinación granulométrica del material fino realizada en invierno (usualmente el período con menos materiales finos) en el aforador de Cal Rodó mostró una textura arenosa, con un porcentaje de arena entre el 86% y el 91%. A una distancia de 100 m aguas arriba del aforador, el porcentaje de arenas gruesas es del 69%, mientras que a 10 m de éste, coincidiendo con una disminución de la pendiente del cauce, es de sólo un 19%.

El tamaño D_{50} de las partículas minerales transportadas en suspensión para las tres áreas de estudio es de 14 μm de diámetro, por tanto se trata de limo fino. El análisis de frecuencias de todas las muestras

Tabla 2. Diámetro de las partículas y concentraciones para las tres estaciones de aforo.

Table 2. Particle size and sediment concentration for the three gauging stations.

	n	D ₁₀ (micras)	D ₅₀ (micras)	D ₉₀ (micras)	Concentración (g l ⁻¹)
Total	72	1,76	8,85	34,43	19,24
Cal Rodó	42	1,54	7,15	25,86	22,01
Ca l'Isard	18	1,95	11,15	46,40	25,13
Can Vila	12	2,27	11,36	46,47	0,70

analizadas indica que un 15,3% del total de muestras tienen un D₅₀ alrededor del mismo valor (entre 12 y 16 µm). Con respecto a cada una de las áreas estudiadas encontramos que a) en Cal Rodó el 19,1% de las muestras tienen un D₅₀ comprendido entre 12 y 16 µm; b) En Ca l'Isard el porcentaje resultante es del 11,1%; y c) En Can Vila sólo un 8,3% de muestras tienen un D₅₀ dentro de este rango.

Analizados los datos de los percentiles (tabla 2) se observa que tanto Ca l'Isard como Can Vila, las dos subcuencas, exportan un material más grueso que el registrado en el punto de salida de Cal Rodó. Los resultados de D₉₀ muestran que apenas se produce transporte en suspensión de las partículas de la fracción arena. Estadísticamente hay diferencias significativas entre las dos subcuencas (Ca l'Isard y Can Vila) y la cuenca de Cal Rodó para los tres grupos de percentiles (p < 0,000). La tabla 2 también refleja la diferencia de concentración entre Can Vila y las otras dos estaciones, que puede explicarse por las características de las cuencas; Can Vila es una cuenca bien cubierta por vegetación, con muy poca extensión de las áreas con erosión intensa, mientras que Cal Rodó y Ca l'Isard contienen zonas de cárcavas que son la mayor fuente de aporte de sedimentos (Regües *et al.*, 2000).

Tabla 3. Diámetro de las partículas para diferentes estaciones del año.

Table 3. Seasonal distribution of particle size.

	D10 (micras)	D50 (micras)	D90 (micras)
Primavera	2,25	12,65	54,16
Verano	1,57	8,08	33,57
Otoño	1,7	7,66	25,06

Analizadas todas las muestras y ordenadas por estaciones (tabla 3), se observa que en primavera se produce el transporte de partículas más gruesas, mientras que en otoño predominan las más finas. Sólo en primavera se aprecia la fracción de arena muy fina, aunque no sea ésta la estación con mayor transporte de sedimentos. Estadísticamente esta diferencia de tamaño de partículas entre primavera y otoño es significativa (p < 0,001), mientras que no existen diferencias significativas entre las estaciones de verano y otoño (p < 0,07 para D₉₀ y p < 0,45 para D₁₀).

4.2 Relación entre el tamaño de las partículas y la concentración de sedimento

Para analizar la relación entre el tamaño de las partículas y la concentración de los sedimentos en suspensión se han seleccionado las 72 muestras anteriores, estableciéndose las relaciones de concentración (g l⁻¹) con D₅₀ y D₉₀ (µm). En la tabla 4 se pueden observar los resultados para todas las muestras así como para cada una de las estaciones.

El coeficiente de correlación entre el tamaño de las partículas y la concentración del sedimento en suspensión es positivo en todos los casos pero sólo resulta significativo para la cuenca de Cal Rodó (p < 0,05 en el D₅₀ y p < 0,01 en el D₉₀) (Fig.3).

Tabla 4. Coeficientes de correlación lineal entre el diámetro de las partículas, la concentración y el caudal de agua. En cursiva se indican los estadísticamente significativos al 0,05 y en negrita al 0,01.

Table 4. Linear correlation coefficients between particle size, concentration and water discharge. Italics show correlations significant at the 0,05 confidence level, and bold at the 0,01 level.

	TODO		CALRODO		CA L'ISARD		CANVILA	
	D ₁₀	D ₅₀	D ₁₀	D ₅₀	D ₁₀	D ₅₀	D ₁₀	D ₅₀
Concentración g l ⁻¹	r=0,1385 n=72	r=0,2541 n=72	r=0,2877 n=42	r=0,6158 n=42	r=0,1319 n=18	r=0,2457 n=18	r=0,3974 n=12	r=0,3649 n=12
Caudal l s ⁻¹	r=0,4626 n=72	r=0,4751 n=72	r=0,6527 n=42	r=0,7426 n=42	r=0,8629 n=18	r=0,8467 n=18	r=0,5012 n=12	r=0,5471 n=12

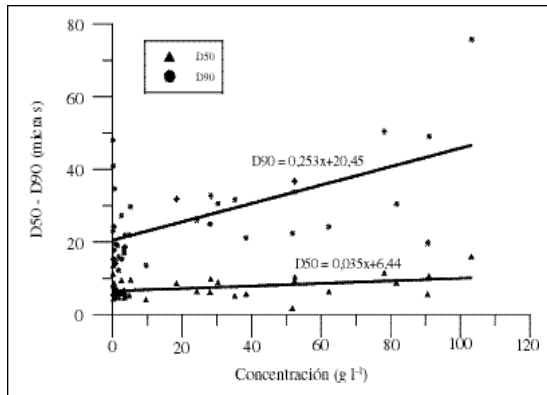


Figura 3. Relación entre la concentración de sedimentos en suspensión y los diámetros D_{50} y D_{90} en la cuenca de Cal Rodó.
 Figure 3. Relationship between sediment concentration and diameters D_{50} and D_{90} in the Cal Rodó catchment.

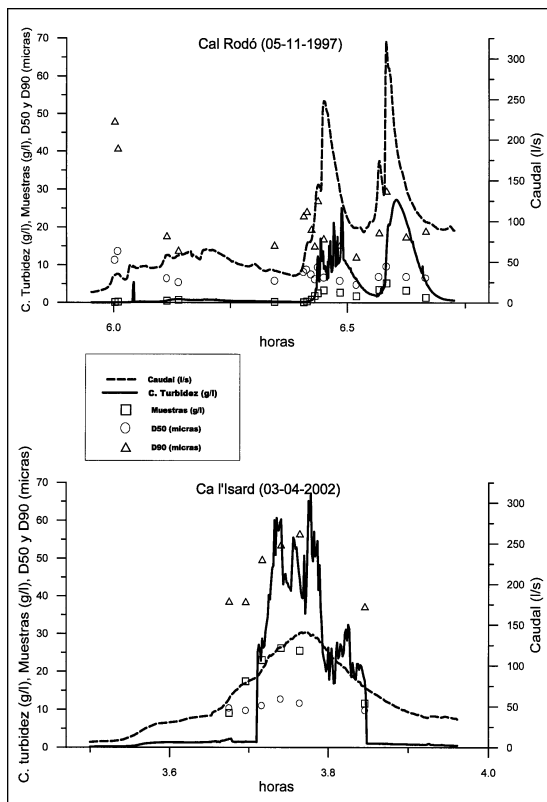


Figura 4. Descripción de dos crecidas en las cuencas de Cal Rodó y Ca l'Isard mostrando las curvas de caudal, de la concentración estimada a partir de la turbidez, de la concentración de sólidos en las muestras y de la granulometría de las partículas.

Figure 4. Discharge, sediment concentration estimated from turbidity, sample sediment concentrations and particle sizes in two different events in Cal Rodó and Ca l'Isard stations.

En la figura 4 se muestran dos ejemplos de crecidas producidas durante las estaciones lluviosas (primavera y otoño) en las estaciones de aforo de Cal Rodó y Ca l'Isard, considerando el tamaño de las partículas (D_{50} y D_{90}), la concentración de sedimento en suspensión en las muestras automáticas y también la concentración estimada a partir de la turbidez. No se incluye un ejemplo de Can Vila, porque al tratarse de una cuenca vegetada raramente se recogen más de cuatro muestras con la suficiente masa de sedimento para ser analizado.

En primer lugar se observa que, exceptuando las primeras muestras, el tamaño de las partículas tiende a ser mayor cuanto mayor es la concentración del sedimento transportado en suspensión. Tanto en la cuenca de Cal Rodó como en la subcuenca de Ca l'Isard las primeras muestras recogidas presentan un tamaño de las partículas bastante grueso en relación con la concentración de sedimentos que en el caso de la primera muestra, se debe a los restos de agua con sedimento que quedan en el tubo del muestreador y que contaminan ligeramente las muestras con muy baja concentración. En el caso de las muestras siguientes se observa como el sedimento tiende a disminuir de tamaño en los primeros estadios de la crecida.

Cabe señalar que en las dos crecidas mostradas en la figura 4 la relación entre caudal y concentración de sedimentos es positiva, mostrando bucles de histéresis positiva (dextrógira) bien marcado en Ca l'Isard y poco definido en Cal Rodó.

En la figura 5 se muestran las relaciones entre D_{50} y concentración de sedimentos para las mismas crecidas de la figura 4. Puede observarse que en los dos casos el tamaño de las partículas es mayor para concentraciones bajas y altas que para concentraciones medias. El aumento del tamaño para concentraciones elevadas es fácilmente explicable por la elevada energía disponible, mientras que el tamaño relativamente grande de las partículas con baja concentración al principio de la crecida puede explicarse por removilización de acumulaciones en el cauce de partículas de tamaño relativamente grande. Por último, las últimas muestras de las crecidas indican un descenso del tamaño de las partículas al mismo tiempo que una disminución de la concentración, lo que puede explicarse por una sedimentación selectiva de las partículas más gruesas. Esta relación compleja entre el tamaño de las partículas y la concentración de sedimentos explica la escasa dependencia lineal mostrada en la tabla 4.

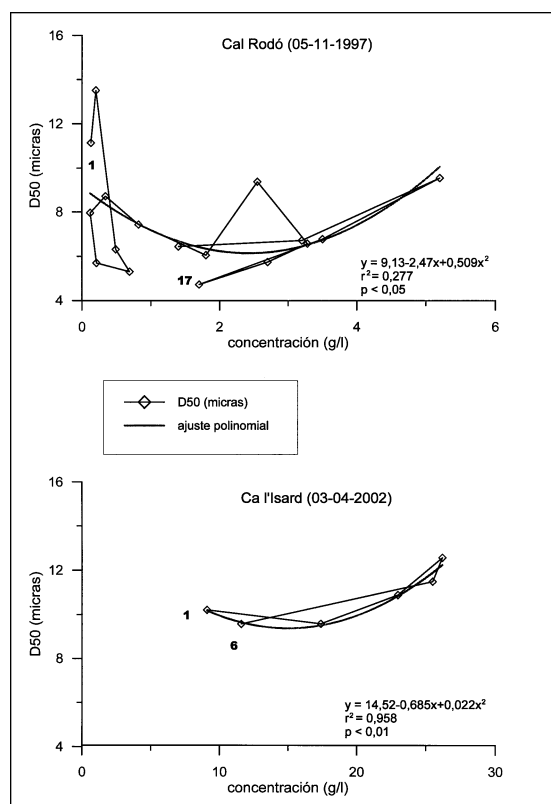


Figura 5. Relación entre concentración de sedimento y diámetro medio (D_{50}) para las mismas crecidas de la figura 4.
 Figura 5. Relationship between sediment concentration and median diameter (D_{50}) for the same events of figure 4.

4.3. Relación entre el tamaño de las partículas y el caudal

Para las 72 muestras estudiadas anteriormente y para cada una de las estaciones se ha establecido una relación entre el caudal, el D_{50} y el D_{90} de las partículas transportadas en suspensión. Existe una correlación lineal estadísticamente significativa ($p < 0,01$) entre estas dos variables para las estaciones de aforo de Cal Rodó y Ca l'Isard, mientras que en Can Vila no existe correlación significativa (tabla 4).

En la figura 4 también se observa que el comportamiento de las partículas en suspensión es casi paralelo a la curva del caudal, más claramente para D_{90} que para D_{50} . Es decir, el pico del hidrograma también coincide con el tamaño más grueso del material transportado, tanto en Cal Rodó como en Ca l'Isard.

Sin embargo, hay que destacar que las primeras y las últimas muestras de cada crecida, tal como ya se ha indicado antes, tienen un comportamiento anómalo. Las primeras muestras, cuando apenas ha subido el nivel del agua, tienen un tamaño relativamente grande, a la vez que en las primeras horas del hidrograma el tamaño no aumenta con el caudal. Con respecto a las últimas muestras recogidas en cada una de las crecidas, cabe decir que el D_{50} no disminuye tan rápidamente como el caudal.

También hay que destacar que en la cuenca de Cal Rodó el caudal es casi el doble que en la subcuenca de Ca l'Isard y en cambio el 90% del material recogido en las muestras no sobrepasa las 30 μm de diámetro, mientras que en la subcuenca de Ca l'Isard el pico más alto llega a la fracción arena.

5. Discusión y conclusiones

En el caso de nuestra área de estudio, los torrentes tienen energía suficiente para transportar un amplio rango de materiales en suspensión durante las avenidas, no obstante, el D_{50} de las muestras recogidas del sedimento en suspensión en el área de estudio oscila entre 4 y 22 micras, resultado que indica que el transporte es casi exclusivamente de partículas finas. Resultado parecido se ha encontrado en los ríos ingleses (Walling *et al.*, 2000), aunque en condiciones muy distintas. Según Slattery y Burt (1997) la afluencia de material fino de las laderas de las cuencas es un factor causante del decrecimiento de la medida de las partículas en suspensión. Lenzi y Marchi (2000) sugieren que el tamaño de las partículas del sedimento en suspensión es generalmente similar a aquellas partículas de las áreas de erosión de las vertientes y depositadas a las orillas del canal. Walling *et al.* (2000) también describen que las principales características de las partículas se deben a su área de origen y a su distribución espacial. Salvany *et al.* (1997) trabajaron en la determinación textural de los suelos de Vallcebre que clasificaron, según el sistema USDA, como franco-limosos; coincidiendo así la fracción mayoritaria del sedimento en suspensión con el material de origen.

Solamente en la cuenca principal (Cal Rodó) aparece una relación lineal significativa entre tamaño de las partículas y la concentración del sedimento en suspensión, mientras que con el cau-

dal las correlaciones lineales obtienen un resultado positivo. Como citan Lenzi y Marchi (2000), hay una relación general positiva entre incremento del caudal y el tamaño de las partículas, de modo que el tamaño de las partículas del sedimento en suspensión está afectado por las variaciones de los flujos hidráulicos. Igualmente se ha observado que, en las condiciones de Vallcebre, las características del sedimento están más influenciadas por los procesos de vertiente en las cárcavas que por los procesos propiamente fluviales.

Durante una crecida, las primeras muestras recogidas tienen una concentración relativamente baja y una granulometría relativamente gruesa, atribuible a la removilización de los materiales del lecho del río depositados al final de la crecida anterior. Al progresar la crecida la concentración aumenta pero la granulometría decrece por la llegada de materiales finos procedentes de las vertientes; solamente en los momentos de mayor caudal y concentración el tamaño de las partículas suele sobrepasar el observado al principio de la crecida. Al final de la crecida disminuye la concentración y aumenta la fracción más fina lo cual indica que se produce la sedimentación del material más grueso ya que no se puede atribuir a una llegada de nuevo material más fino.

En primavera, el sedimento transportado en suspensión es más grueso que en verano y otoño. Esto puede explicarse por el hecho de que el aporte de materiales al lecho de los torrentes muestra un carácter estacional, originado por las pautas de meteorización y desarrollo del regolito en las áreas de cárcavas, así como por la generación de escorrentía. Así, durante el otoño, el regolito de las cárcavas está sellado y muestra las menores capacidades de infiltración del año, lo cual queda reflejado en la mayor producción de sedimentos, mientras que en primavera el aporte de sedimentos proveniente de la erosión de las vertientes es menor (Gallart et al., 2002). El menor aporte de sedimentos de las vertientes de las cárcavas durante la primavera favorece la re-erosión de los materiales depositados previamente en los cauces, que, como hemos discutido antes, suelen ser de granulometría más gruesa que los aportados por las vertientes.

En Cal Rodó el porcentaje de arena es menor que en las subcuencas. Esto puede ser atribuido a que la salida de Cal Rodó se encuentra aguas abajo de las dos subcuencas y las partículas han sufrido

un mayor desgaste por efecto de la fricción y disolución, ya que en nuestro caso las partículas de arena están compuestas sobre todo por calcita, dolomita, yeso y agregados de arcilla, materiales blandos y/o de fácil dilución.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado mediante la financiación de los proyectos HIDROESCALA (REN2000-1709/GLO), PROHISEM (REN2001-2268/HID) y el acuerdo CSIC-DGCONA (RESEL). Agradecemos a Oscar Ávila y Xavier Huguet su ayuda con los instrumentos y la recogida de datos y muestras. Los comentarios de dos revisores anónimos han ayudado a mejorar el manuscrito original

Referencias bibliográficas

- Aepler, R. (1968). *Das Garumnium der Mulde von Vallcebre und ihre Tektonik (Spanien, Provinz Barcelona)*. Diplomarbeit, Naturwissenschaftlichen Fakultät der Freien Universität Berlin, Berlin, 101 pp.
- Balash, J.C. (1998). *Resposta hidrològica i sedimentària d'una petita conca de muntanya analitzades a diferent escala temporal*. Tesis doctoral, Universidad de Barcelona, Barcelona (España), 372 pp.
- Batalla, R.J. & Sala, M. (1994). Magnitud y frecuencia del transporte fluvial de sedimento en una cuenca mediterránea semihúmeda. *Pirineos*, 143-144, 3-15.
- Castelltort, X. (1995). *Erosió, transport i sedimentació fluvial com a integració dels processos geomorfològics d'una conca*. Tesis doctoral. Universidad de Barcelona, Barcelona (España), 234 pp.
- Feist, M., Colombo, F. (1983). La limite Cretacé-Tertiaire dans le NE de l'Espagne du point de vue des Charofites. *Colloque Sénonien, Géologie Méditerranéenne*. Vol. 10 n° 3-4, 303-326.
- Fontolan, G. & Grenni, P. (1995). Response to different methods of suspended sediment sample storage before Coulter Multisizer Analysis: I. inorganic matter. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 41, 101-116.
- Gallart, F., Llorens, P., Latron, J. & Regüés, D. (2002). Papel de la estacionalidad climática en los procesos hidrológicos y el transporte de sedimentos en las cuencas experimentales de Vallcebre (Prepirineo Catalán). *Estudios recientes (2000-2002) en Geomorfología. Patrimonio, montaña y dinámica territorial*. Dpto. Geografía-UVA. Valladolid, 489-499.

- Lenzi, M.A. & Marchi, L. (2000). Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (northeastern Italy). *Catena*, 39, 267-282.
- Leopold, L.B. & Maddock, T. (1953). The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. *U.S. Geol. Surv Prof. Paper*, 352, 1-57.
- Regiús, D., Balasch, C., Castelltort, X., Soler, M. & Gallart, F. (2000). Relación entre las tendencias temporales de producción y transporte de sedimento y las condiciones climáticas en una pequeña cuenca de montaña mediterránea (Vallcebre, Pirineos Orientales). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 26, 41-65.
- Regiús, D., Soler, M. & Gallart, F. (2002). Influencia del tamaño de las partículas sobre la estimación de concentración de sedimentos en suspensión mediante turbidímetros de retrodispersión. *Estudios recientes (2000-2002) en Geomorfología. Patrimonio, montaña y dinámica territorial*. Dpto. Geografía-UVA. Valladolid, 239-251.
- Reid, I. & Frostick, L.E. (1987). Flow dynamics and suspended sediment dynamics in arid zone flash flood. *Hydrological Processes*, 1, 239-253.
- Russell, M.A., Walling, D.E. & Hodgkinson, R.A. (2001). Suspended sediment sources in two small lowland agricultural catchments in the UK. *Journal of Hydrology*, 252, 1-24.
- Salvany, M.C., Soler, M., Josa, R. & Hereter, A. (1997). Data set No. 8: Study of the soil particle size in Cal Rodó catchment. Internal report for the Project ENV4-CT95-0134 (Inédito).
- Slattery, M.C. & Burt, T.P. (1997). Particle size characteristics of suspended sediment in hillslope runoff and stream flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22 (8), 705-719.
- Solé, A., Josa, R., Pardini, G., Aringhieri, R., Plana, F. & Gallart, F. (1992). How mudrock and soil physical properties influence badland formation at Vallcebre (Pre-Pyrenees NE Spain). *Catena*, 31, 28-38.
- Soil Survey Staff (1975). *Soil Taxonomy. A Basic system of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. USDA-SCS Agric. Handbook 436, 754 pp.
- Walling, D.E. & Webb B.W. (1987). Suspended load in gravel-bed rivers: UK experience. En: *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers* (C.R., Thorne C.R., J.C. Bathurst J.C. & R.D. Hey R.D. (eds)). John Wiley & Sons, Chichester, 691-732.
- Walling, D.E., Owens, P.N., Waterfall, B.D., Leeks, G. J.L. & Wass P.D. (2000). The particle size characteristics of fluvial suspended sediment in the Humber and Tweed catchments, UK. *The Science of the Total Environment*, 251/252, 205-222.

Recibido 10 de diciembre de 2002.

Aceptado 15 de julio de 2003.