



LA EXPORTACIÓN DE SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN EN UNA CUENCA DE CAMPOS ABANDONADOS, PIRINEO CENTRAL ESPAÑOL

*Suspended sediment outputs from an abandoned farmland catchment,
Central Spanish Pyrenees*

A. Lorente⁽¹⁾, C. Martí Bono⁽¹⁾, S. Beguería⁽¹⁾, J. Arnáez⁽²⁾ y J. M. García Ruiz⁽¹⁾

(1) Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC, Campus de Aula Dei, Apartado 202, 50080 Zaragoza.

(2) Area de Geografía Física. Universidad de La Rioja, 26004 Logroño.

e-mail: humberto@ipe.csic.es

Resumen: Se ha estudiado la variabilidad temporal del transporte de sedimento en suspensión en la cuenca experimental de Arnás, Pirineo Central español. La relación entre caudal máximo y concentración máxima de sedimento en suspensión de las crecidas sólo es elevada durante la estación fría. En verano la relación es muy pobre, debido a la gran separación entre tormentas. El pico de tormenta (diferencia entre el pico de crecida y el flujo de base) es el factor más importante para explicar la variabilidad de la concentración de sedimento en suspensión, seguido por la intensidad de la lluvia. La precipitación registrada los días anteriores a cada crecida sólo influye durante la estación fría. El predominio de curvas de histéresis positivas de la relación entre caudal y concentración de sedimento durante las crecidas sugiere que las principales fuentes de sedimento se localizan en el propio cauce y áreas próximas.

Palabras clave: Sedimento en suspensión, Cuenca experimental, Crecidas, Fuentes de sedimentos, Pirineo Central.

Abstract. The temporal variability of suspended sediment outputs has been studied in the Arnás experimental catchment, Central Spanish Pyrenees. Relationships between peak flow and peak of suspended sediment concentration for floods is only high during the cold season. In summer the relationship is very poor, due to both the long separation between rainstorms. The so called rainstorm peak (the difference between peak flow and base flow) is the most important factor for explaining the variability of suspended sediment concentration, followed by the intensity of rainfall. Precipitation recorded the days before each flood only influences during the cold season. The prevailing positive hysteresis loops of the sediment concentration/discharge relationships during floods suggests that the main sediment sources are located in the channel and neighbouring areas.

Key words: Suspended sediment, Experimental catchment, Floods, Sediment sources, Central Pyrenees.



Lorente, A., Martí Bono, C., Beguería, S., Arnáez, J. y García Ruiz, J. M. (2000). La exportación de sedimento en suspensión en una cuenca de campos abandonados, Pirineo Central. *Rev. C.&G.*, 14 (1-2), 21-34. © SEG. AEQUA. GEOFORMA Ediciones

1. Introducción

Las llamadas cuencas experimentales permiten la cuantificación del transporte de sedimento a distintas escalas temporales y su relación con el régi-

men de precipitaciones y de caudal. La elaboración de balances de sedimentos sólo es posible con cierta precisión en cuencas de reducido tamaño (inferior, en general, a 10 Km²), donde es relativamente sen-

cillo el muestreo continuado de la turbidez, de la conductividad eléctrica o incluso de la carga de fondo. El interés de este conocimiento ha sido ya puesto de manifiesto por otros autores (ver, por ej., Walling, 1991), para quienes la variabilidad temporal en las características del transporte de sedimento es un excelente indicador de los procesos y relaciones que se establecen en el interior de una cuenca.

En España funcionan varias cuencas experimentales, algunas desde principios de los años ochenta (García Ruiz & Gallart, 1997). Entre ellas pueden citarse las de Izas, alto Pirineo aragonés (Díez *et al.*, 1988; Martínez Castroviejo *et al.*, 1991), Vallcebre, Pirineo catalán (Llorens & Gallart, 1990 y 1992; Llorens *et al.*, 1997) y Guadalperalón, dehesa extremeña (Gómez Amelia & Schnabel, 1996; Schnabel, 1997; Ceballos & Schnabel, 1998), además de otras localizadas en el SE de España (Murcia, Almería) y en la Cordillera Costera Catalana (Batalla *et al.*, 1995). En el Pirineo aragonés se han instalado en 1995 otras dos cuencas (Arnás y San Salvador). El estudio de diferentes procesos hidrológicos (características de las avenidas, interceptación, evapotranspiración, infiltración, generación de escorrentía) y geomorfológicos (transporte de sedimento, fuentes de sedimentos) constituye el eje básico de investigación en la mayor parte de las cuencas experimentales españolas.

Los balances de sedimentos realizados en diversas cuencas del mundo reflejan una gran variabilidad en el comportamiento de los diferentes tipos de material transportado, explicándose el predominio de uno u otro en función de la litología, la cubierta vegetal, los usos del suelo o la pendiente. Incluso en una misma cuenca se producen grandes variaciones temporales, relacionadas con la distribución temporal e intensidad de los picos de crecida.

De los tres tipos de sedimento transportado por un río (en disolución, en suspensión y como carga de fondo), el sedimento en suspensión es el que mejor permite un estudio continuado de relaciones con el caudal. Los solutos están siempre presentes en el agua y su variabilidad es pequeña, mientras que la carga de fondo sólo es desplazada durante avenidas de elevada magnitud, lo que restringe el número de casos. En cambio el sedimento en suspensión está prácticamente ausente en momentos de aguas bajas y se moviliza de inmediato con ligeros incrementos de caudal.

El objetivo de este trabajo es, en primer lugar, identificar y jerarquizar los factores que explican la variabilidad temporal de la concentración de sedimento en suspensión y su relación con los picos de crecida. En segundo lugar, se pretende obtener información indirecta sobre las fuentes de sedimentos a partir del comportamiento del sedimento en suspensión.

2. El área de estudio

La cuenca experimental de Arnás se localiza en el Valle de Borau (prov. de Huesca, Pirineo Central), que sigue una dirección general N-S y está recorrido por el río Lubierre, afluente del Aragón (figura 1). La cuenca de Arnás, con 284 ha. de superficie, presenta una orientación general NW-SE, alcanzando su altitud máxima a 1341 m y la mínima a 910 m.

El sustrato geológico sobre el que se asienta está formado en su totalidad por margas y areniscas del

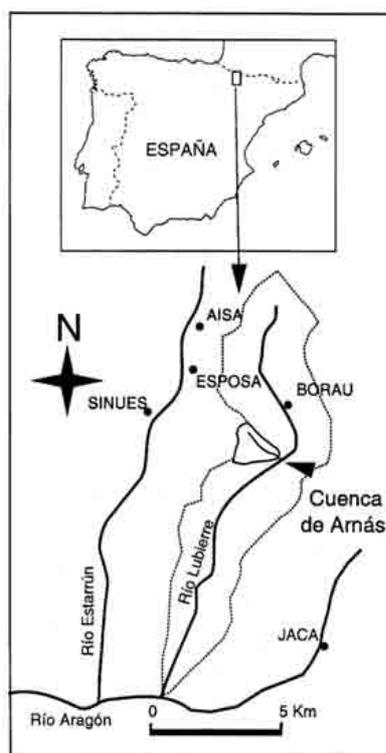


Figura 1. Localización de la cuenca experimental de Arnás.
Location of the Arnás experimental catchment.

flysh eoceno surpirenaico. La disposición estructural de estos materiales, que, en general, buzan suavemente hacia el Norte, implica una diferenciación clara entre las dos vertientes de la cuenca: la ladera soleada, más abrupta, presenta movimientos en masa del tipo de coladas de piedra (debris flows), de escasa longitud y desconectadas de la red fluvial. En la ladera orientada al Norte, con pendiente mucho más suave, es frecuente la presencia de antiguas cicatrices y lenguas de movimientos en masa profundos, de edad desconocida, que indudablemente son anteriores a la ocupación humana (figura 2).

La erosión difusa severa afecta sobre todo a las vertientes convexas de la ladera solana, con una más lenta recolonización por el matorral. No obstante, sobre el terreno no se ha podido comprobar su conexión con la red fluvial, excepto en áreas próximas al cauce.

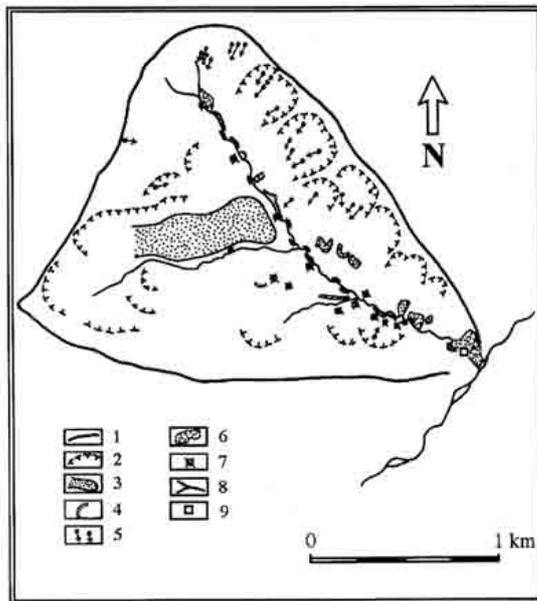


Figura 2. Esquema geomorfológico de la cuenca de Arnás. 1: Divisoria principal. 2: Cicatrices supuestas de antiguos deslizamientos profundos. 3: Lenguas de deslizamiento. 4: Cicatrices de deslizamiento. 5: Coladas de piedras. 6: Áreas afectadas por erosión difusa severa. 7: Áreas frecuentemente saturadas. 8: Red fluvial. 9. Localización del flume y estación meteorológica
Geomorphic scheme of the Arnás catchment. 1: Main divide. 2: Supposed scars of old deep slides. 3: Tongues of slides. 4: Scars of slides. 5: Debris flows. 6: Areas affected by severe sheet wash erosion. 7: Frequently saturated areas. 8: Fluvial network.

Los suelos dominantes en la cuenca son el regosol calcáreo en la solana y el kastanozem háplico en la umbría. El primero presenta una baja capacidad de retención de agua y elevada pedregosidad, mientras el segundo es más profundo, bien estructurado, con alto contenido en materia orgánica y buena permeabilidad (Gallart *et al.*, 1999).

La cuenca tiene un clima submediterráneo con influencias atlánticas, con una precipitación media anual de 930 mm (Esposa a 980 m s.n.m.) con máximos en otoño y primavera. También son frecuentes las fuertes tormentas estivales, aunque las avenidas más importantes tienden a presentarse en octubre y noviembre.

Toda la cuenca estuvo cultivada hasta mediados del siglo xx mediante campos pendientes, a veces ligeramente abancalados en los sectores cóncavos. En la actualidad la mayor parte de las antiguas parcelas se hallan cubiertas de matorral, con tendencia a bosque abierto de *Pinus sylvestris* y *Quercus gr. faginea* en la parte alta de la umbría. El matorral está constituido por una formación densa de *Buxus sempervirens*, *Genista scorpius*, *Rosa gr. canina*, *Juniperus communis* y *Echynospartum horridum*.

3. Equipamiento y métodos

La cuenca experimental está equipada de una torre meteorológica y una estación de aforos, situadas inmediatamente antes de la desembocadura del barranco de Arnás en el río Lubierre. La torre meteorológica dispone de los siguientes sensores: termómetro, higrómetro, anemómetro, piranómetro y pluviómetro.

La estación de aforos se compone de un flume al que se ha incorporado el siguiente instrumental:

- Sensor de ultrasonidos para medir la altura del nivel del agua (Lundahl DCU-7110).
- Turbidímetro (LYX 800 PT1), que permite estimar la cantidad de sedimento en suspensión que circula por el flume, después de haber sido calibrado en laboratorio.
- Tomamuestras automático de agua (ISCO 3700) con capacidad para 24 botellas, que se dispara durante la parte ascendente del hidrograma en el momento en que el nivel alcanza 22 cm (407 l s^{-1}).

- d) conductímetro, que permite estimar la cantidad de solutos que transporta en disolución el agua a partir de la conductividad eléctrica.

Todos estos sensores están conectados a data loggers que toman información cada 5 segundos, registrando la media cada 5 minutos. Los datos son descargados periódicamente mediante un ordenador portátil. También se dispone en la estación de aforos de una trampa de sedimento situada inmediatamente antes de la sección con una capacidad de 2000 kg., que atrapa el sedimento que circula como carga de fondo.

En este trabajo se analizan 39 crecidas registradas durante los años 1996 y 1997. Para ello se ha considerado como crecida todo incremento de caudal que supera en al menos 3 veces el caudal previo a la tormenta. De cada una de las crecidas se han calculado los siguientes parámetros:

- Precipitación total (mm)
- Intensidad máxima de la precipitación en 30 minutos (mm)
- Intensidad máxima de la precipitación en 60 minutos (mm)
- Salida total de agua (l)
- Pico de crecida ($l s^{-1}$)
- Pico de tormenta (diferencia entre el pico de crecida y el caudal base) ($l s^{-1}$)
- Pico de concentración del sedimento en suspensión ($mg l^{-1}$)
- Exportación total de sedimento en suspensión (Kg).
- Coeficiente de escorrentía (%)
- Tiempo de respuesta del caudal (*time lag*) (minutos)
- Tiempo de respuesta del sedimento (minutos)

Con la información disponible se han elaborado matrices de correlación y se ha aplicado un Análisis de Varianza (Anova) para establecer los rasgos más significativos de las crecidas. Una regresión múltiple paso a paso ha permitido identificar los factores que se muestran más directamente implicados en el transporte de sedimento

4. Resultados

La tabla 1 muestra las principales características de las crecidas consideradas en este estudio,

incluyendo tanto el pico de concentración de sedimento en suspensión como la cantidad total de sedimento en suspensión exportado durante cada crecida. Al margen de los momentos de crecida la turbidez (y, por lo tanto, el transporte de sedimento en suspensión) es prácticamente nula. La concentración más elevada alcanza valores de $6922 mg l^{-1}$ (9.01.1996), si bien la mayor parte de los máximos registrados está entre 1000 y $3000 mg l^{-1}$. El valor más bajo corresponde a una crecida del 01.01.1996, con tan sólo $34.4 mg l^{-1}$. La salida total de sedimento en suspensión supera las 100 toneladas en la crecida del 21.01.1996. Las cifras de exportación han sido también muy elevadas el 17.12.1997, aunque la mayoría de las crecidas han exportado menos de 10 toneladas. Durante estas dos últimas crecidas se registraron los valores más elevados de caudal de la serie analizada (1883 y $1865 l s^{-1}$ respectivamente).

Las precipitaciones de los años 1996 y 1997 estuvieron muy próximas a la media estimada para el área de estudio. Todas las precipitaciones caídas entran dentro de los valores más frecuentes. La cifra más elevada ($61.2 mm$ el 21.01.1996) corresponde a un período de retorno de entre 1 y 3 años y, por lo tanto, los picos de caudal obtenidos responden también a una recurrencia muy alta.

4.1 La variabilidad del transporte de sedimento en suspensión

La tabla 2 incluye información sobre caudal y transporte de sedimento en suspensión, distinguiendo entre estación cálida (mayo-octubre) y estación fría (noviembre-abril). La mayoría de las crecidas (62%) ocurrió durante la estación fría. De todas las variables incluidas en el análisis de varianza cuatro son significativas para un nivel superior al 95%; la precipitación máxima registrada en 30 y 60 minutos y el tiempo de retraso (*lag*) del pico de caudal y del pico de transporte de sedimento.

Resulta interesante comprobar que durante los dos años de estudio la intensidad de la precipitación (en 30 y 60 minutos) fue notablemente superior durante la estación cálida en comparación con la fría. Por esta razón, el tiempo de retraso de los picos de caudal y sedimento es más breve durante la estación cálida, de manera que ambas variables tienen una respuesta más rápida. Una quinta varia-

Tabla 1. Características generales de las crecidas en la cuenca de Arnás.
General characteristics of floods in the Arnás catchment.

	Fecha	Precipitación Total (mm)	Caudal máximo (l/s)	Precipitación máxima en 30 min. (mm)	Máxima Concentración SS(mg/l)	Carga Total en suspensión (Kg)
1	1/01/96	8,0	101,20	1,6	34,40	44
2	5/1/96a	9,0	119,41	3,0	372,58	290
3	5/1/96b	14,6	366,55	3,4	1099,53	1863
4	6/01/96	6,2	164,37	2,2	464,27	368
5	7/01/96	5,2	118,12	0,8	73,29	58
6	9/01/96	36,2	905,41	2,8	6922,56	25606
7	21/01/96	61,2	1883,79	8,6	5793,43	116213
8	1/04/96	14,2	198,37	3,2	629,57	1335
9	16/04/96	18,0	113,66	4,4	258,39	340
10	6/05/96	36,0	207,66	3,0	922,38	2222
11	7/05/96	5,6	120,03	2,2	155,85	170
12	9/05/96	9,8	92,81	8,0	913,80	316
13	10/05/96	11,2	193,81	1,6	316,74	759
14	18/5/96a	9,2	96,44	5,6	1753,71	727
15	18/5/96b	7,2	162,97	3,2	1195,83	782
16	19/05/96	9,6	176,03	3,2	459,09	519
17	7/08/96	29,2	191,75	9,2	2382,21	2175
18	20/01/97	4,6	439,78	1,0	1166,31	3366
19	22/01/97	8,0	82,63	1,8	86,00	86
20	14/02/97	27,6	122,00	3,6	280,93	767
21	16/07/97	35,0	1716,24	9,4	4549,34	41655
22	22/07/97	7,4	116,18	1,8	47,26	45
23	23/07/97	20,8	767,19	20,6	3342,70	14145
24	28/07/97	11,0	139,90	8,8	315,18	395
25	4/08/97	27,6	81,54	17,8	4558,07	1526
26	10/08/97	16,6	89,27	3,6	1228,13	892
27	1/09/97	25,4	142,00	15,6	4459,23	4457
28	6/11/97	9,4	167,21	1,6	1122,09	1780
29	7/11/97	17,0	167,21	1,6	1114,56	1612
30	8/11/97	25,2	678,56	3,4	1859,30	10462
31	10/11/97	36,4	800,07	3,0	2320,07	19640
32	18/11/97	14,0	106,76	1,8	205,29	254
33	29/11/97	21,8	161,94	2,2	425,63	1090
34	30/11/97	3,4	188,56	2,4	298,89	361
35	2/12/97	11,4	372,89	3,6	1833,00	3872
36	16/12/97	56,2	697,81	4,2	1353,81	14310
37	17/12/97	28,9	1864,99	2,6	3120,30	80275
38	18/12/97	37,0	688,50	8,6	2085,35	30042
39	31/12/97	19,0	287,12	1,2	496,12	1922

ble (caudal medio de crecida) es significativa sólo para un nivel del 90%, proporcionando valores más elevados en estación fría que cálida. Este resultado es consecuente con el, en general, mayor volumen de precipitación durante cada evento en el primero que en el segundo caso.

Las restantes variables no presentan significación estadística pero también apuntan en la misma

dirección que los datos precedentes: la carga total de sedimento en suspensión es muy superior durante crecidas de estación fría, mientras que el pico de concentración de sedimento en suspensión es algo mayor en estación cálida.

Se ha realizado un análisis similar distinguiendo las crecidas según su pico de caudal. Para ello se han utilizado las mismas variables que en el análisis

Tabla 2. Análisis de varianza de las crecidas en la cuenca experimental de Arnás en relación con la estación del año. Número total de crecidas: 39. Crecidas en estación fría: 24. Crecidas en estación cálida: 15. * Variables con significación > 95 %.
*Analysis of variance of the floods in the Arnás experimental catchment, in relation to the season of the year. Total number of floods: 39. Cold season floods: 24. Hot season floods: 15. * Variables with signification over 95 %.*

Variable	Estación fría	Estación cálida	F-Test	Nivel Signif.
P total	20.5	17.4	0.5	0.496
P máx. 30	3.1	7.6	11.4	0.001*
P máx. 60	4.5	9.0	8.8	0.005*
Q medio (l/s)	187.0	101.4	4.0	0.052
Q máx. (l/s)	450.0	286.2	1.1	0.304
S.S. máx. (mg/l)	1369.5	1773.3	0.4	0.508
Carga total (kg)	12329.4	4.719	1.2	0.277
Lag de Q (min.)	222.5	131.0	4.3	0.045*
Lag de S.S. (min.)	198.8	93.0	5.4	0.025*
Pico de torm. (l/s)	408.1	239.2	1.2	0.286

sis precedente y se han separado las crecidas con un pico de menos de 300 l s^{-1} (27 en total) y las de más de 300 l s^{-1} (12 en total). Los resultados se incluyen en la tabla 3 y sorprenden por el hecho de que las variables estadísticamente significativas son precisamente aquellas que no lo eran en la tabla 2. Los resultados entran dentro de lo que cabría esperar: las mayores crecidas corresponden a mayores volúmenes de precipitación, presentan un pico de concentración de sedimento en suspensión más elevado y transportan una carga de sedimento

mucho más importante por evento (28.450 kg frente a 937 kg). En cambio, la intensidad máxima de precipitación en 30 y 60 minutos no presenta significación, si bien el dato medio obtenido indica que las mayores crecidas coinciden también con lluvias de mayor intensidad.

En todo caso, las diferencias obtenidas en cuanto a significación en las tablas 2 y 3 reflejan que para algunas cuestiones (intensidad de la precipitación, velocidad de respuesta del caudal y del sedimento en suspensión) influye mucho la estación del año en que

Tabla 3. Análisis de varianza de las crecidas en la cuenca experimental de Arnás en relación con la intensidad de la crecida. Número total de crecidas: 39. Crecidas con < 300 l/s de caudal: 27. Crecidas con > 300 l/s de caudal: 12. *Variables con significación superior al 95 %.

*Analysis of variance of the floods in the Arnás experimental catchment in relation to the intensity of the flood. Total number of floods: 39. Floods under 300 l/s: 27. Floods over 300 l/s: 12. *Variables with signification over 95 %.*

Variable	< 300 l/s	> 300 l/s	F-Test	Nivel Signif.
P total (mm)	14.3	30.7	16.1	<0.001*
P máx. 30	4.3	5.9	1.1	0.307
P máx. 60	5.6	7.6	1.2	0.274
Q medio (l/s)	85.8	307.7	53.0	<0.001*
Q máx. (l/s)	144.9	931.8	53.6	<0.001*
S.S. máx. (mg/l)	913.7	2953.8	17.0	<0.001*
Carga total (kg)	936.8	28449.8	22.1	<0.001*
Lag de Q (min.)	183.9	195.0	0.1	0.822
Lag de S.S. (min.)	130.6	220.0	3.3	0.075
Pico de torm. (l/s)	105.6	877.8	50.5	<0.001*

se produce el evento pluviométrico; en cambio, para otras cuestiones (concentración de sedimento en suspensión y carga total de sedimento transportado) lo que cuenta es el nivel alcanzado por la crecida.

4.2 El sedimento en suspensión en relación con el caudal

La figura 3 muestra la existencia de tres patrones diferentes de crecidas de acuerdo con las relaciones que se establecen entre caudal (hidrograma) y concentración de sedimento en suspensión (sedígrama).

- i) El pico de transporte de sedimento en suspensión precede ligeramente al pico de crecida, un fenómeno típico de lluvias cortas y no necesariamente intensas (figura 3a). Esta relación ha sido descrita por diferentes autores (Emmett, 1970; Walling, 1974; Gurnell, 1987; Alvera & Puigdefábregas, 1985; Batalla & Sala, 1995) como algo común de las cuencas pequeñas, con una respuesta rápida del transporte de sedimento, que coincide bastante bien con el momento de máxima intensidad de la precipitación. Sin

embargo, algunos autores han apuntado como un hecho más frecuente la coincidencia de ambos picos e incluso cierto retraso del pico de concentración de sedimento (por ej., Tropeano, 1991, en pequeñas cuencas del noroeste de Italia).

- ii) El pico principal de concentración de sedimento en suspensión se produce cuando ya se ha iniciado el tramo descendente del hidrograma. Otros picos pueden acompañar o preceder al pico de crecida (figura 3b), pero el último coincide probablemente con una caída local del talud desestabilizado por zapamiento y humectación. Es un fenómeno relativamente frecuente en cuencas de reducida superficie, donde pequeños movimientos en masa próximos al cauce tienen grandes —aunque breves— repercusiones en el transporte de sedimento (Hayward, 1980). De hecho, el sedígrama de la figura 3b muestra un ascenso y descenso súbitos, característicos del paso de una «nube» de sedimento.
- iii) Durante crecidas de larga duración pueden producirse dos o más picos de caudal, coin-

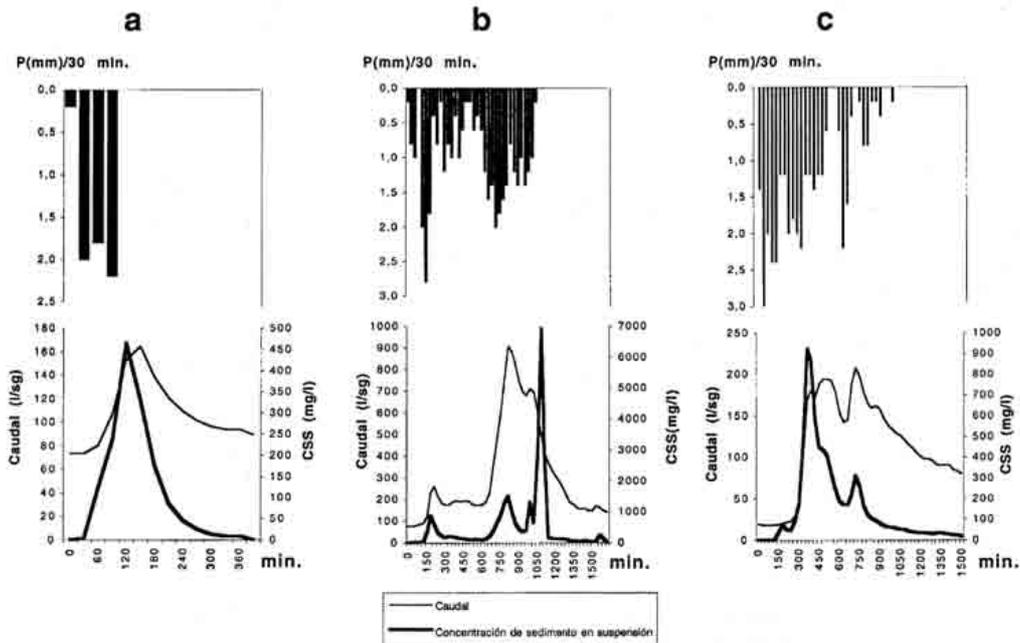


Figura 3. Diferentes patrones en la relación entre caudal y concentración de sedimento en suspensión durante crecidas.
Different patterns in the relationships between discharge and suspended sediment concentration during floods.

ciendo con otros tantos periodos de precipitación más intensa. Lo que caracteriza a este grupo de crecidas es que el segundo pico de concentración de sedimento es claramente inferior al primero (figura 3c). Este fenómeno se debe quizás a un efecto de agotamiento de sedimento en el propio cauce, pero caben también otras interpretaciones: una posibilidad es que se deba a un proceso de dilución, ya que la cuenca está más húmeda y las áreas bien vegetadas pueden suministrar agua limpia (Gallart *et al.*, 1998; Latron *et al.*, 1997); por otro lado, no debe olvidarse que el flujo de base debe ser muy superior en el segundo pico que en el primero, lo que hace que el sedimento incorporado por el segundo pico de crecida reduzca su concentración. La figura 4 compara las curvas de histéresis de dos crecidas correspondientes al día 18.05.1996 y separadas entre sí por tan sólo 9 horas. La segunda de las avenidas registra valores similares o incluso inferiores de transporte de sedimento con un caudal notablemente superior.

La figura 5 muestra la regresión entre el pico de crecida y el pico de concentración de sedimento en suspensión. En contra de lo que cabría esperar el resultado es bastante pobre, con un coeficiente de correlación relativamente bajo, aunque positivo y significativo ($r=0.63$; $p=0.0001$), inferior al calcula-

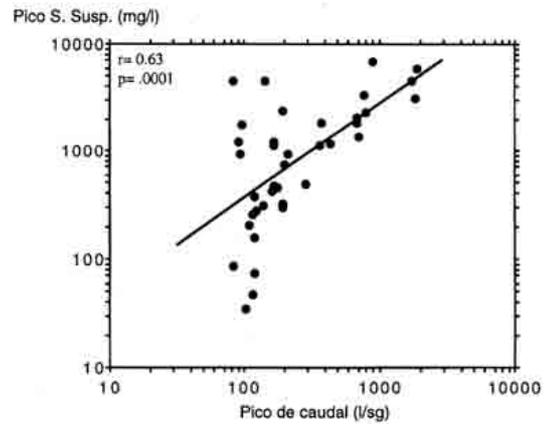


Figura 5. Relaciones entre el pico de caudal y el pico de concentración de sedimento en suspensión en periodo de crecidas. Relationships between peak discharge and peak suspended sediment concentration during floods.

do por otros autores en ambientes no muy diferentes (ver, por ej., Tropeano, 1991). De hecho, a partir de la figura 5 puede deducirse fácilmente un incremento del sedimento en suspensión a medida que aumenta el caudal, aunque muchos puntos aparecen dispersos lejos de la línea de regresión. Este resultado demuestra que la variabilidad en la concentración del sedimento en suspensión no está exclusivamente ligada a la capacidad de transporte del agua.

Si sólo se tienen en cuenta las crecidas de la estación fría (figura 6), entonces el coeficiente de

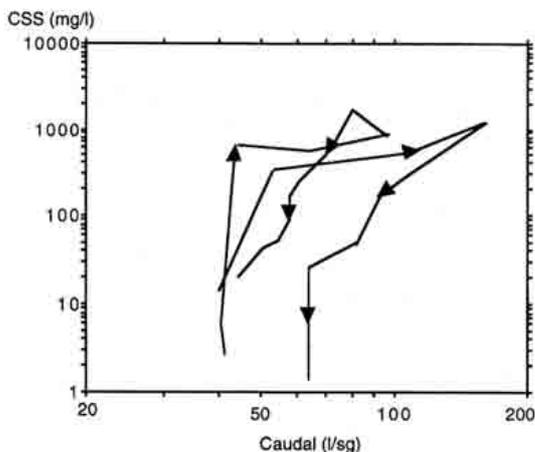


Figura 4. Curvas de histéresis de dos crecidas consecutivas. Hysteretic curves of two consecutive floods.

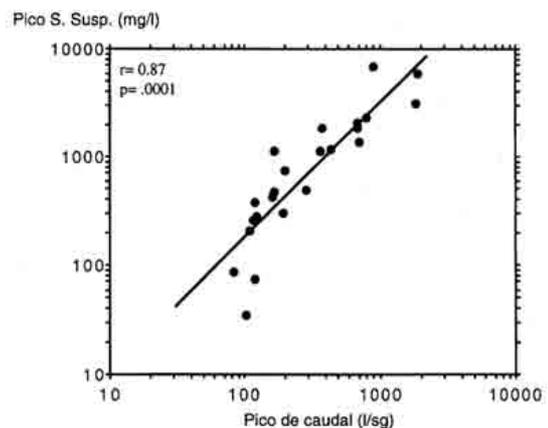


Figura 6. Relaciones entre el pico de caudal y el pico de concentración de sedimento en periodo de crecidas durante la estación fría. Relationships between peak discharge and peak suspended sediment concentration during cold season floods.

correlación aumenta sensiblemente ($r=0.87$; $p=0.0001$), mientras que en el caso de las crecidas de estación cálida el resultado carece de significación, debido a que incluso con caudales pequeños es posible una elevada concentración de sedimento en suspensión.

La utilización de los residuales obtenidos a partir de la regresión de la figura 5 no aumenta, en general, la explicación de la variabilidad del comportamiento del sedimento en suspensión en relación con el pico de caudal. El mejor resultado se ha obtenido al correlacionar tales residuales con la precipitación máxima en 30 minutos ($r=0.63$) (figura 7).

Con el fin de profundizar en la identificación de los factores que explican el pico de sedimento en suspensión se han realizado nuevas regresiones teniendo en cuenta todos los eventos en conjunto y además distinguiendo entre estación cálida y estación fría (tabla 4). Varias regresiones muestran un coeficiente de determinación significativo, aunque individualmente explican una parte relativamente pequeña de la varianza. Así, en el caso de todos los eventos la intensidad de la precipitación (en 30 y 60 minutos), la precipitación total y el pico de tormenta presentan relaciones significativas con el pico de sedimento en suspensión.

Sin embargo, donde tales relaciones son más interesantes es al considerar las crecidas de estación

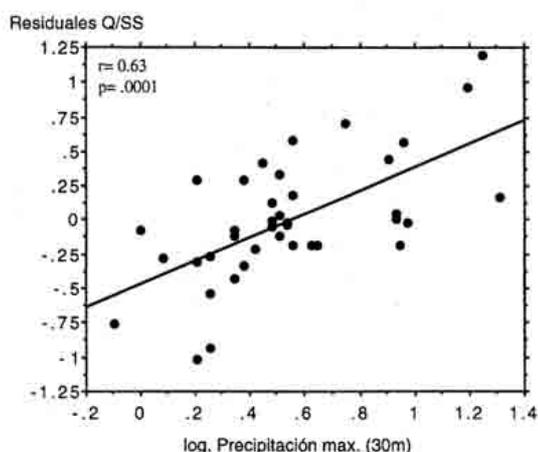


Figura 7. Relaciones entre residuales de la regresión pico de caudal/pico de concentración de sedimento en suspensión y la precipitación máxima en 30 minutos.
Relationships between the residuals of the regression peak discharge/peak suspended sediment concentration and maximum precipitation in 30 minutes.

cálida y fría por separado. En las crecidas de estación cálida el pico de sedimento en suspensión se halla más estrechamente relacionado con la intensidad de la precipitación ($r^2=0.62$ y 0.64 para las precipitaciones máximas en 30 y 60 minutos respectivamente), mientras que en estación fría, además del pico de caudal influye mucho y positivamente el

Tabla 4. Resultado de las regresiones entre el pico de concentración de sedimentos en suspensión y diferentes variables de precipitación y caudal. V1: Precipitación total (mm). V2: Precipitación máxima en 30 minutos (mm). V3: Precipitación máxima en 60 minutos (mm). V4: Precipitación total 3 días antes del pico de caudal (mm). V5: Pico de caudal (l/s). V6: Volumen total de escorrentía de tormenta (litros). V7: Pico de tormenta (l/s).

Regressions between the peak of suspended sediment concentration and different variables of precipitation and discharge. V1: Total precipitation (mm). V2: Maximum precipitation in 30 minutes (mm). V3: Maximum precipitation in 60 minutes. V4: Total precipitation 3 days before the flood (mm). V5: Peak discharge (l/s). V6: Total volume of stormflow (litres). V7: Peak of the stormflow (l/s).

	Todos los eventos			Estación fría			Estación cálida		
	r	r ²	p	r	r ²	p	r	r ²	p
V1	0.64	0.41	<0.001	0.62	0.38	0.001	0.72	0.52	0.002
V2	0.62	0.38	<0.001	0.53	0.28	0.076	0.79	0.62	<0.001
V3	0.67	0.45	<0.001	0.61	0.38	0.001	0.80	0.64	<0.001
V4	0.42	0.18	0.010	0.63	0.40	0.002	0.19	0.04	0.487
V5	0.63	0.39	<0.001	0.87	0.75	<0.001	0.35	0.12	0.198
V6	0.47	0.22	0.002	0.79	0.62	<0.001	0.07	0.00	0.487
V7	0.70	0.49	<0.001	0.92	0.84	<0.001	0.49	0.24	0.064

pico de tormenta y, en menor medida, el volumen total de escorrentía durante la tormenta y la precipitación registrada durante los 3 días anteriores a cada evento. Esta última variable sólo tiene alguna influencia durante la estación fría, lo que, por otra parte, puede considerarse como algo lógico dada la separación temporal existente entre tormentas en estación cálida y la rápida pérdida de las reservas de agua en el suelo por evapotranspiración.

La tabla 5 muestra los resultados obtenidos para las regresiones entre la carga total de sedimento en suspensión y diferentes variables de caudal y precipitación. En este caso las intensidades tienen mucho menos valor y lo que cuenta es el pico de tormenta, el pico de caudal y el volumen total de escorrentía durante la crecida, con valores de r que llegan hasta 0.95 en las crecidas de estación fría. Este resultado es, evidentemente, muy lógico, y no hace sino poner en evidencia que la carga total transportada está en relación directa con la cantidad de agua que ha circulado en cada crecida. Ahora bien, lo más interesante es tener en cuenta que las correlaciones sólo son elevadas cuando se consideran todos los eventos en conjunto o los generados en estación fría. En las crecidas de estación cálida las únicas regresiones aceptables se producen con la precipitación total y con los picos de crecida y de tormenta. El volumen total de escorrentía de tormenta presenta una correlación despreciable con la carga total de sedimento, confirmando el comportamiento especial de este grupo de crecidas.

Por último, se han realizado dos análisis de regresión múltiple paso a paso, considerando como

variable dependiente al pico de concentración de sedimento en suspensión en un caso, y a la carga total de sedimento en suspensión, en otro. Las variables independientes utilizadas aparecen en la tabla 6. Para el pico de sedimento dos variables explican el 73% de la varianza, destacando el pico de tormenta (es decir, el pico de crecida menos el flujo de base), con un 53%, seguido por la precipitación máxima en 30 minutos. Para la carga total de sedimento intervienen cuatro variables, que llegan a explicar en conjunto el 96% de la varianza, si bien la primera (de nuevo el pico de tormenta) llega a absorber el 87% de la varianza explicada.

5. Discusión y conclusiones

En la cuenca de Arnás el sedimento en suspensión es un componente muy importante de los materiales transportados en momentos de avenida y en el balance anual. Arnáez *et al.* (1998) realizaron un primer balance, muy provisional, para esta misma cuenca, representando el sedimento en suspensión un 55% frente a un 45% de solutos y un 5% de carga de fondo. Esta última, sin embargo, puede alcanzar mucha mayor importancia en eventos individuales de elevada intensidad, como demostraron González *et al.* (1997). De igual forma, Arnáez *et al.* (1998) comprobaron que el transporte de partículas en suspensión es un fenómeno casi exclusivo de las crecidas, que contribuyen en un 81% al transporte total de sedimento en suspensión.

Tabla 5. Resultado de las regresiones entre la carga total de sedimentos en suspensión y diferentes variables de precipitación y caudal. Las variables utilizadas han sido las mismas que en la Tabla 4.

Regressions between the total suspended sediment load and different variables of precipitation and discharge. The variables used are the same than in Table 4.

	Todos los eventos			Estación fría			Estación cálida		
	r	r^2	p	r	r^2	p	r	r^2	p
V1	0.76	0.57	<0.001	0.75	0.56	<0.001	0.79	0.62	<0.001
V2	0.43	0.19	0.005	0.57	0.33	0.003	0.63	0.40	0.011
V3	0.50	0.25	0.001	0.65	0.43	<0.001	0.63	0.40	0.010
V4	0.60	0.36	<0.001	0.70	0.49	<0.001	0.27	0.07	0.339
V5	0.89	0.79	<0.001	0.95	0.90	<0.001	0.77	0.59	0.008
V6	0.80	0.64	<0.001	0.90	0.80	<0.001	0.58	0.33	0.024
V7	0.93	0.86	<0.001	0.97	0.95	<0.001	0.86	0.74	<0.001

Tabla 6. Análisis de regresión múltiple paso a paso.
Stepwise regression analysis.

A) Variable dependiente: Máxima concentración de sedimentos en suspensión		
Variables independientes: Precipitación total (mm). Máxima precipitación en 30 minutos (mm). Máxima precipitación en 60 minutos (mm). Precipitación 3 días antes del comienzo del evento (mm). Pico de caudal (l/sg). Pico de tormenta (l/sg). Volumen total de agua (l)		
<i>Orden de entrada de las variables:</i>		
Paso 1	Pico de tormenta	Coefficiente de determinación 53 %
Paso 2	P máxima en 30 minutos	Coefficiente de determinación 73 %
<i>Ecuación:</i> $\log(\text{PSS}) = 0.9468 + 0.6809 \log(\text{P1}) + 0.8177 \log(\text{P2})$		
B) Variable dependiente: Carga total (kilos)		
Variables independientes: las mismas que en A		
<i>Orden de entrada de las variables:</i>		
Paso 1	Pico de tormenta	Coefficiente de determinación 87 %
Paso 2	Precipitación total	Coefficiente de determinación 93 %
Paso 3	P. máxima en 30 minutos	Coefficiente de determinación 95 %
Paso 4	P. 3 días antes del evento	Coefficiente de determinación 96 %
<i>Ecuación:</i> $\log(\text{CT}) = -0.8856 + 1.1255 \log(\text{P1}) + 0.9666 \log(\text{P2}) + 0.4565 \log(\text{P3}) + 0.1585 \log(\text{P4})$		

La concentración de sedimento en suspensión muestra una gran variabilidad temporal, ligada a las fluctuaciones de caudal. Sin embargo, las relaciones entre pico de crecida y pico de sedimento en suspensión proporciona un coeficiente de determinación relativamente bajo, indicando que:

- i) La concentración de sedimento en suspensión no está exclusivamente relacionada con las variaciones de caudal (ver también Llorens *et al.*, 1997), en parte porque los picos de caudal y de sedimento raras veces coinciden en el tiempo (figura 3) y en parte porque el transporte depende mucho de la disponibilidad de sedimento en el cauce y taludes próximos. La caída masiva de una parte del talud al cauce durante la fase de ascenso o de recesión provoca una notable perturbación en las relaciones con el pico de caudal. Por otra parte, la forma en que se produce el ascenso del hidrograma tiene mucho que ver con el sedimento transportado, a veces tanto o más que la altura alcanzada por el pico de crecida. Esa es la razón por la que el pico de tormenta se convierte

en el factor más determinante, en especial durante las crecidas de estación fría.

- ii) Existen diferentes procesos que reducen los ajustes entre pico de caudal y concentración de sedimento en suspensión, especialmente cuando las crecidas se encuentran muy próximas en el tiempo (Hayward, 1980). De hecho, en este trabajo se ha comprobado que tras una avenida de cierta intensidad la siguiente avenida presenta un pico notablemente inferior de concentración de sedimento en suspensión. Un cierto agotamiento del sedimento tras una primera crecida es muy posible, pero conviene no olvidar que si el flujo de base es muy alto puede dar lugar a una dilución del caudal de crecida, provocando un efecto aparente de agotamiento, como ya ha sugerido Walling (1978). Precisamente, el análisis de regresión paso a paso ha puesto de relieve que el factor más importante no es el pico de caudal, sino el pico de tormenta, una vez se ha restado el flujo de base al pico de crecida. Este resultado demuestra que el propio flujo

de base se convierte en un factor de incertidumbre a la hora de explicar el pico de concentración de sedimento en suspensión. Gallart *et al.* (1998) y Latron *et al.* (1997) apuntan que tras una primera crecida el estado de elevada humedad de la cuenca favorece el aumento de la escorrentía procedente de las áreas bien protegidas por la vegetación, por lo que aumenta la contribución de agua con baja concentración de sedimento.

- iii) Cada tipo de crecida presenta un comportamiento diferente en cuanto al transporte de sedimento. Por ello los factores considerados aquí de forma individual contribuyen sólo parcialmente a explicar la varianza del sedimento en suspensión. Un aspecto muy interesante en este sentido es el distinto funcionamiento de las crecidas de estación cálida y estación fría. Puede sorprender el hecho de que las relaciones entre sedimento y variables independientes es superior en el caso de las crecidas de estación fría y además los factores que más influyen en cada caso son distintos. Lo que es evidente es que durante la estación fría la respuesta del sedimento en suspensión es más previsible porque también lo es el funcionamiento hidrológico de la cuenca. En cambio, la incertidumbre aumenta durante la estación cálida debido muy probablemente tanto a la intensidad y brevedad de las precipitaciones como al efecto de la evapotranspiración. No debe olvidarse que, por ejemplo, en las cuencas experimentales de Vallcebre puede registrarse en verano una precipitación de 50 mm en 24 horas sin que se produzca escorrentía (Gallart *et al.*, 1998). Estos mismos autores confirman que los caudales de crecida en tiempo húmedo son fácilmente simulados, mientras que las crecidas de verano y principios de otoño presentan dificultades severas de modelización.

Los análisis estadísticos han demostrado que el pico de tormenta es el factor más importante para explicar la variabilidad de la concentración de sedimento en suspensión, seguido por la intensidad de la precipitación (tabla 6). El pico de caudal presenta un elevado coeficiente de determina-

ción ($r^2=0.8$) en el caso de crecidas de estación fría. La precipitación total explica sólo una pequeña parte de la varianza y la precipitación registrada durante los tres días anteriores a cada evento muestra también una cierta influencia en estación fría mientras que en la cálida no tiene ningún peso. Durante la estación cálida, con tormentas de menor duración y escasa incidencia del flujo de base, la intensidad de la precipitación se convierte en el factor más importante por su impacto erosivo y por la capacidad de transporte de la escorrentía difusa.

El predominio de curvas de histéresis positivas durante las crecidas sugiere que las principales fuentes de sedimento en la cuenca de Arnás se localizan en el propio cauce, en sus taludes y áreas próximas afectadas por erosión difusa (González *et al.*, 1997; ver a este respecto una conclusión similar en Clark, 1995). Los estudios realizados sobre la distribución de Cesio¹³⁷ a cargo del Departamento de Edafología de la Estación Experimental de Aula Dei (ver Gallart *et al.*, 1999) confirman que los suelos de la solana han sido los más afectados por la erosión. Probablemente son también los que en condiciones de precipitaciones prolongadas pueden aportar cantidades importantes de sedimento en suspensión desde fuera de los aledaños del cauce, especialmente desde las laderas convexas próximas al canal principal. En todo caso, la histéresis positiva confirma lo que resulta cada vez más evidente en áreas de montaña abandonadas: la recolonización vegetal de los antiguos campos de cultivo, cubiertos de manera casi general por matorrales densos, limita cada vez más la superficie ocupada por las fuentes más activas de sedimentos (García Ruiz *et al.*, 1996a). No obstante, el predominio de los campos pendientes -no abancalados- en la cuenca de Arnás y la existencia de laderas afectadas por la agricultura itinerante hasta mediados del siglo XX, explican la gran importancia del sedimento en suspensión, en claro contraste con lo que sucede en cuencas dominadas por antiguas terrazas de cultivo (García Ruiz *et al.*, 1996b; Llorens *et al.*, 1997). Por esta razón se ha llegado a afirmar (Arnáez *et al.*, 1998) que el patrón de transporte de sedimento en la cuenca de Arnás está más cerca de otras cuencas de alta montaña que de las de montaña media y baja.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado con el apoyo de los siguientes proyectos de investigación: «Water resource management in a changing environment: The impact of sediment on sustainability»-WAR-MICE (ENV4-CT98-0789), «Validating hydrological models using process studies and internal data from research basins»-VAHMPIRE (ENV4-CT95-0134) y «Debrisfall assessment in mountain catchments for local end-users»-DAMOCLES (EVG1-1999-00027P), financiados por la Comisión Europea, y «Producción de escorrentía y sedimento como consecuencia de los cambios de uso del suelo en áreas de montaña» (AMB96-0401) y «Estaciones permanentes para el estudio de procesos hidrológicos en ambientes mediterráneos» (HID98-1056-C02-01), financiados por la CICYT. Los autores agradecen a los Dres. F. Gallart y G. Benito sus sugerencias para mejorar el contenido de este trabajo.

Referencias bibliográficas

- Alvera, B. & Puigdefábregas, J. (1985). Pulsación diaria de la carga suspendida y disuelta en la escorrentía de fusión nival. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 11: 5-20.
- Arnáez, J., García Ruiz, J. M., Martí Bono, C., Bordonaba, A., Errea, M.P. & White, S. (1998). Avenidas y transporte de sedimentos en una pequeña cuenca de montaña del Pirineo Central. In *Investigaciones recientes de la geomorfología española* (A. Gómez Ortiz & F. Salvador, eds.). Sociedad Española de Geomorfología, pp. 161-170, Granada.
- Batalla, R. & Sala, M. (1995). Temporal variability of suspended sediment transport in a Mediterranean sandy gravel-bed river. *IAHS Publ.*, 224: 299-305.
- Batalla, R., Sala, M. & Werrity, A. (1995). Sediment budget focused in solid material transport in a sub-humid Mediterranean drainage basin. *Z. Geomorph.*, 39 (2). 249-264.
- Ceballos, A. & Schnabel, S. (1998). Hydrological behaviour of a small catchment in the dehesa landuse system (Extremadura, SW Spain). *Hydrological Processes*, 210: 146-160.
- Clark, C. (1995). Sediment sources and their environmental controls. In *Sediment and water quality in river catchments* (I.D.L. Foster, A.M. Gurnell & B.W. Webb, eds.), John Wiley, pp. 121-141, Chichester.
- Díez, J. C., Alvera, B., Puigdefábregas, J. & Gallart, F. (1988). Assessing sediment sources in a small drainage basin above timberline in the Pyrenees. *IAHS Publ.*, 174: 197-205.
- Emmett, W. W. (1970). The hydraulics of overland flow. *US Geol. Survey Prof. Paper*, 662A.
- Gallart, F., Latron, J. & Regúés, D. (1998). Hydrological and sediment transport processes in the research catchments of Valcebre (Pyrenees). In *Modelling erosion by water* (J. Boardman & D. Favis-Mortlock, eds.), Springer Verlag, 503-511, Berlin.
- Gallart, F., Llorens, P., Latron, J., Regúés, D. & Salvany, C. (1998). Las cuencas experimentales de Valcebre (I). Funcionamiento hidrológico. In *Investigaciones recientes de la geomorfología española* (A. Gómez Ortiz & F. Salvador, eds.). Sociedad Española de Geomorfología, pp. 187-192, Granada.
- Gallart, F., White, S. & Llorens, P. (coord.) (1999). Validating hydrological models using process studies and internal data from research basins. Tools for assessing hydrological impacts of environmental change (VAHMPIRE). Final Report, European Commission, Programme on Environment and climate, 371 pp., Barcelona.
- García Ruiz, J. M. & Gallart, F. (1997). Las cuencas experimentales como base para el estudio de la erosión y la desertificación. In *El paisaje mediterráneo a través del espacio y del tiempo. Implicaciones en la desertificación* (J.J. Ibáñez, B.L. Valero & C. Machado, eds.), Geoforma Ediciones, pp. 221-238, Logroño.
- García Ruiz, J. M., Lasanta, T., Ruiz Flaño, P., Ortigosa, L., White, S., González, C. & Martí Bono, C. (1996a). Land-use changes and sustainable development in mountain areas: a case study in the Spanish Pyrenees. *Landscape Ecology*, 11(5). 267-277.
- García Ruiz, J. M., Lasanta, T., González, C., Martí, C., White, S., Errea, M.P. & Maestro, M. (1996b). La agricultura marginal como fuente de sedimentos en el Pirineo Central. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 21: 123-132.
- Gómez Amelia, D. & Schnabel, S. (1996). Hidrología y erosión en ambientes de pastoreo extensivo. In *Erosión y recuperación de tierras en áreas marginales* (T. Lasanta & J.M. García Ruiz, eds.), Instituto de Estudios Riojanos y Sociedad Española de Geomorfología, pp. 137-154, Logroño.

- González, C., García Ruiz, J. M., Martí Bono, C., White, S., Errea, M. P. & Arnáez, J. (1997). Sediment sources in a small, abandoned farmland catchment, Central Spanish Pyrenees. *Physics and Chemistry of the Earth*, 22(3-4), 291-293.
- Gurnell, A. M. (1987). Suspended sediment. In *Glacio-fluvial sediment transfer* (A.M. Gurnell & M.J. Clark, eds.), Wiley, pp. 305-354, Chichester.
- Hayward, J. A. (1980). *Hydrology and stream sediment from Torlesse stream catchment*. Tussock Grasslands and Mountain Lands Institute, 235 pp., Canterbury, New Zealand.
- Latron, J., Llorens, P. & Gallart, F. (1997). Studying spatial and temporal patterns of runoff generation processes in a mountain Mediterranean basin (Vallecebre, Catalonia). In *Ecohydrological processes in small basins* (D. Viville & I Littlewood, eds.), IHP-V *Technical Documents in Hydrology*, 14, UNESCO, 1-5.
- Llorens, P. & Gallart, F. (1990). Simulación por ordenador de la respuesta hidrológica y de transporte de sólidos en una cuenca de campos abandonados. *I Reunión Nacional de Geomorfología*, pp. 619-628, Teruel.
- Llorens, P. & Gallart, F. (1992). Small basin response in a Mediterranean mountainous abandoned farming area: Research design and preliminary results. *Catena*, 19(3-4), 309-320.
- Llorens, P., Queralt, I., Plana, F. & Gallart, F. (1997). Studying solute and particulate sediment transfer in a small Mediterranean mountainous basin subject to land abandonment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22: 1027-1035.
- Martínez Castroviejo, R., García Ruiz, J. M., Díez, J.C. & Alvera, B. (1991). Coarse sediment transport in an experimental high mountain catchment of Central Pyrenees. *Z. Geomorph. Suppl. Bd.*, 83: 105-114.
- Schnabel, S. (1997). *Soil erosion and runoff production in a small watershed under silvopastoral landuse (dehesas) in Extremadura, Spain*. Geofoma Ediciones, 160 pp., Logroño.
- Tropeano, D. (1991). High flow events and sedimentary transport in small streams in the «Tertiary Basin» area in Piedmont (Northwest Italy). *Earth Surface Processes and Landforms*, 16 (4), 323-339.
- Walling, D. E. (1974). Suspended sediment and solute yields from a small catchment prior to urbanization. In *Fluvial Processes in Instrumented Watersheds* (K.J. Gregory & D.E. Walling, eds.), pp. 169-192, Institute of British Geographers, Special Publ., 6.
- Walling, D. E. (1978). Suspended sediment and solute response characteristics of the river Exe, Devon, England. In *Research in fluvial systems* (R. Davidson-Arnot & W. Michling, eds.), Geo Abstracts, pp. 169-197, Norwich.
- Walling, D. E. (1991). Drainage basin studies. In *Field experiments and measurement programs in Geomorphology* (O. Slaymaker, ed.), Balkema, pp. 17-59, Rotterdam.

Recibido el 15 de diciembre de 1999

Aceptado el 2 de febrero de 2000