

Concentración de sólidos en suspensión durante eventos hidrológicos individuales

M^a Luz Rodríguez Blanco, M^a Mercedes Taboada Castro,
M^a Teresa Taboada Castro
Universidad de A Coruña

RESUMEN. El objetivo de este trabajo consiste en conocer la influencia de los episodios de lluvia en los contenidos de sólidos en suspensión en las aguas superficiales de una cuenca rural de 16 km² de extensión, con sustrato de esquisto y clima templado húmedo. Para ello, se analizó la evolución de la concentración de sólidos en suspensión en 11 eventos individuales producidos entre diciembre de 2004 y diciembre de 2005. Los resultados obtenidos, con mayores concentraciones de sólidos en suspensión en los eventos de otoño e invierno, muestran que los contenidos de sólidos en suspensión no sólo dependen de la cantidad y duración de la precipitación, sino también, de las condiciones de humedad y uso del suelo. Se observa que al inicio del evento las concentraciones de sólidos son bajas (generalmente menores de 10 mg/L) y que éstas se incrementan de forma paralela al caudal describiendo fenómenos de histéresis en sentido de las agujas del reloj. Las concentraciones máximas de sólidos se alcanzan con el pico de caudal, o justo antes de éste, y después decrecen de manera rápida lo que es indicativo de que la fuente de sedimento está limitada.

Palabras clave: sólidos en suspensión; cuenca agroforestal; histéresis; erosión del suelo; eventos individuales.

ABSTRACT. The objective of this work is to know the influence of the rain episodes in the suspended solid contents in superficial waters of a rural river basin of 16 km² of extension, with substrate of schist and humid temperate climate. The evolution of the suspended solid concentrations was analyzed during 11 single-events that happened between December of 2004 and December of 2005. The obtained results, with greater suspended solid concentrations in the events of autumn and winter, demonstrate that the suspended solid contents depend on the amount and duration of the precipitation but also of the conditions of humidity and soil use. In all the cases is observed that at the beginning of the event the solid concentrations are low (generally small that 10 mg/L) and that these are increased of parallel form to the water vol-

Recibido: 7 de noviembre de 2006.
Aceptado: 14 de septiembre de 2007.

ume having described clockwise hysteresis. The maximum suspended solid concentrations are reached with the peak flow or before this and later it decreases of fast way. This indicates that the sediment source is limited.

Keywords: suspended solids; agroforestry catchment; hysteresis; soil erosion; single-events.

Introducción

Es ampliamente reconocido que la relación entre la descarga de agua y la concentración de sedimentos en los ríos muestra importantes variaciones temporales, tanto a nivel anual, estacional como de eventos (Walling y Webb, 1983; Steegen et al., 2000). En dicha variación influyen procesos de erosión del suelo, transporte y deposición. La erosión hídrica y escorrentía experimentan una gran oscilación en el espacio y en el tiempo debido a la variabilidad de los factores que las originan, siendo por tanto esos factores los que rigen la exportación de sedimentos dentro de una cuenca rural. Entre ellos se encuentran los relacionados con la configuración espacial de la cuenca (morfología, organización espacial de los usos del suelo), tipos de cultivo y manejo, características superficiales del suelo (Brodizio et al., 1994; Steegen et al., 2001), usos del suelo (García Ruíz et al., 1995; Sala y Farguell, 2002), hidrología, topografía, condiciones climáticas, etc. (Nearing et al., 1999).

El conocimiento de la dinámica de los sedimentos durante eventos hidrológicos individuales o durante un año hidrológico, permite una mayor y más detallada comprensión de los procesos hidro-geomórficos que tienen lugar en la cuenca (Walling y Webb, 1983; Williams, 1989; Llorens y Gallart, 1992; Asselman, 1999). La relación descarga-sedimento suspendido durante eventos hidrológicos individuales ha sido analizada por diversos investigadores (Klein 1984, Seeger et al., 2004, Lecce et al., 2006). Los fenómenos de histéresis se han atribuido a diferentes mecanismos y han sido usados para efectuar inferencias sobre los procesos de erosión del suelo, distribución de sedimentos y localización del área fuente de los sedimentos transportados a través de un sistema de drenaje (Klein, 1984; Asselman y Middlekoop, 1998; Hudson, 2003), siendo este último el requerimiento más importante para el diseño efectivo de estrategias de control de sedimentos dentro de los planes de manejo de cuencas. La mayor parte de los autores interpretan los fenómenos de histéresis positivos como una indicación de que los sedimentos movilizadados se encuentran cerca o dentro del canal y/o al lavado y posterior agotamiento del material disponible antes del pico de descarga (Wood, 1977; Jeje et al., 1991; Asselman y Middlekoop, 1998) mientras que fenómenos negativos se atribuyen a los sedimentos procedentes de fuentes distantes y distribuidos por procesos de vertiente. No obstante, otros autores consideran que la intervención de factores tales como la vegetación, características de las tormentas, temperatura, condiciones de humedad antecedente, disponibilidad de sedimentos y cárcavas pueden dificultar la identificación de la causa de estas relaciones (Guy, 1964;

Steegeen et al., 2000), por lo que han surgido otras explicaciones, que tienen en cuenta el intervalo entre eventos, la duración del evento, contribución de cárcavas, mayores intensidades de lluvia al comienzo del evento, y una reducción en el efecto erosivo de la lluvia y un incremento en la entrada desde el flujo base después del pico de descarga (Wood, 1977; Jeje et al., 1991; Steegeen et al., 2000).

El objetivo de este trabajo es conocer la concentración de sedimentos en suspensión durante eventos individuales de precipitación producidos en una cuenca rural e intentar relacionar esa concentración con observaciones realizadas dentro de la cuenca con el fin de conocer posibles áreas fuente.

Material y métodos

Para la realización de este trabajo se seleccionó una subcuenca de la zona de cabecera del río Mero (A Coruña, NO España). Se trata de una cuenca rural de 16 Km² de extensión, carente de núcleos importantes de población que supongan una entrada significativa de contaminantes a las aguas.

El río divide la cuenca en 2 zonas bien definidas, la del margen izquierdo presenta un relieve abrupto, con fuertes pendientes (máxima 40%), suelos poco profundos y una vegetación de pino y eucalipto. Por el contrario, la zona de la derecha presenta una menor pendiente, donde predominan las áreas destinadas a cultivo (fundamentalmente maíz) y pasto las cuales representan un 30% del área total de la misma.

La litología es muy uniforme. Consiste en esquistos básicos pertenecientes a los denominados esquistos de la Serie de Ordenes (Parga Pondal, 1966) sobre los que se desarrollan suelos de tipo Cambisol y Umbrisol (FAO, 1998) con texturas medias.

Los datos climatológicos se obtuvieron de una estación meteorológica cercana a la salida de la cuenca. La precipitación durante el período de estudio (diciembre 2004- diciembre 2005) ascendió a 1.140 mm. Presenta una marcada variabilidad anual (figura 1). El máximo pluviométrico estacional se concentra de forma muy clara en otoño (49% de la precipitación total), siendo los meses más lluviosos octubre y noviembre con 221,8 y 207,2 mm respectivamente y los más secos agosto (14,2 mm) y julio (22,4 mm). La temperatura media anual fue del orden de 13 °C, siendo el promedio del mes más frío (diciembre 2004) 8,3 °C y el del más caluroso (agosto) 18,8 °C.

El desarrollo del presente trabajo se ha basado en el análisis de 11 crecidas producidas en el río. Los datos de precipitación se registraron cada 10 minutos. El caudal y los sólidos en suspensión se determinaron a la salida de la cuenca. Se dispone de un sensor de presión (720) conectado a un muestreador automático (ISCO 6712FS) que registra en continuo el nivel del agua almacenando a intervalos de 10 minutos la información obtenida después de haber realizado la media aritmética del mismo. El nivel se transforma a caudal con la curva de gasto.

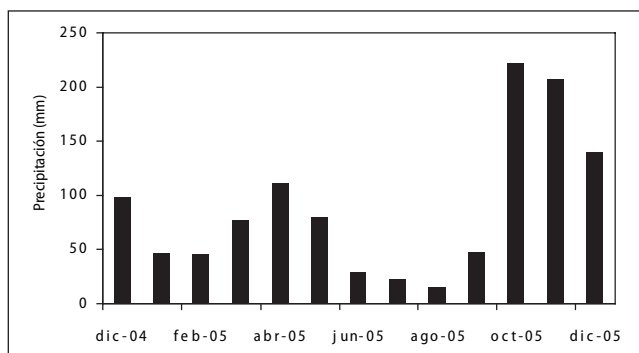


Figura 1. Precipitación mensual durante el período de estudio.

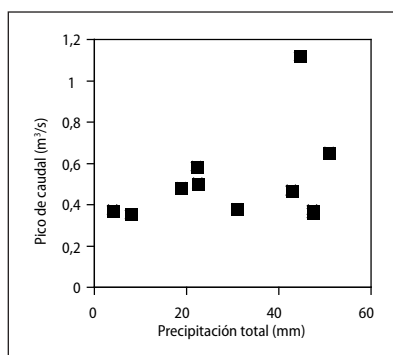


Figura 2. Relación entre volúmenes de precipitación total y picos de caudal.

Las muestras de agua se recogen a intervalos variables de tiempo con el muestreador y manualmente, lo que ha permitido muestrear eventos completos incluyendo ascenso, descenso y pico de caudal. Empleamos un régimen de muestreo estratificado con un mayor número de muestras en el limbo de ascenso que en el de descenso, dados los rápidos incrementos en la concentración de sólidos durante los

eventos. La frecuencia de muestreo también varió entre eventos en función de las características de los mismos.

Las concentraciones de sólidos en suspensión se determinaron por el método gravimétrico. Las muestras de agua se filtraron a través de filtros de membrana de nitrato de celulosa de 0,45 μm (47 mm de diámetro) y a continuación se secaron a 105 $^{\circ}\text{C}$ hasta peso constante.

Resultados y discusión

En la tabla 1 se recogen algunas características hidrológicas y de concentración de sólidos en suspensión en cada uno de los once eventos estudiados entre diciembre de 2004 y diciembre de 2005. Lo primero que se observa tanto a la vista de la tabla 1 como de la figura 2 es que no se establece una relación directa entre las precipitaciones totales con los caudales instantáneos máximos y con la concentración de sólidos en suspensión, lo cual puede ser debido, entre otros factores, al diferente flujo basal presente en el inicio del evento, al estado de saturación y cobertura del suelo y a la continuidad y duración de las lluvias. Así por ejemplo, las precipitaciones que originaron los eventos que alcanzaron mayor concentración de sólidos en suspensión (626, 530, 474 y 294 mg/L respectivamente para los episodios 10, 1, 6, 11) y mayores caudales instantáneos fueron de muy distinta magnitud. Los eventos 1 y 10 se produjeron en respuesta a lluvias continuas (22 mm en 10 horas en el evento 1 y 36 mm en las primeras doce horas del 10) mientras que el evento 6 se originó a consecuencia de una precipitación total de 51 mm, de intensidad débil durante las primeras 18 h y moderadas en las últimas. Los caudales máximos

instantáneos se alcanzan a las 26 horas del inicio de las lluvias para el evento 6 y al cabo de 11, 14 y 17 horas para los eventos 1, 10 y 11 respectivamente.

Estos eventos, con elevada concentración de sólidos en suspensión, tuvieron lugar con condiciones de humedad del suelo que podríamos calificar de húmedas (excepto para el evento número 11 cuya precipitación en los 5 días antecedentes ascendió a 13,8 mm), lo que favorece la escorrentía y formación de surcos en las parcelas que se encuentran sin cobertura vegetal.



Figura 3. Fotografía mostrando parte de los surcos formados durante los eventos 5 y 6 en una ladera fresada en octubre después de la recolección del maíz.

De hecho, a consecuencia de las precipitaciones acaecidas entre el 31 de octubre y el 3 noviembre (eventos 5 y 6), en una parcela (fresada después de la recolección de maíz) situada en una zona de pendiente cercana a la cabecera de la cuenca, se formaron numerosos surcos y cárcavas efímeras que produjeron un importante aporte de sedimentos al cauce (ver figura 3). Estos surcos se agrandaron, e incluso se desarrollaron otros nuevos durante el evento 10. Debido a la disponibilidad de este material fácilmente erosionable los eventos de diciembre de 2005 se caracterizaron por elevadas concentraciones de sólidos en suspensión. La pérdida de suelo por flujo concentrado se ha constatado en varias ocasiones (Valcárcel et al., 2003; Taboada et al., 2005) en zonas agrícolas próximas y de características similares a la de esta parcela, tanto con bajas intensidades de lluvia cuando la superficie del suelo estaba encostrada, como después de cortos eventos de lluvia intensa sobre superficies recién labradas.

En los eventos 7, 8 y 9 las concentraciones de sólidos en suspensión, con valores que oscilan entre 4-88 mg/L, 8-78 mg/l y 9-44 mg/L respectivamente, son muy inferiores a las alcanzadas en el transcurso de los eventos citados anteriormente, pese a producirse con precipitaciones totales similares, en la estación de reposo de la vegetación y en condiciones antecedentes (a excepción del evento 9) húmedas. Esto podría deberse a que se producen con lluvias más duraderas y menos intensas y a la proximidad entre eventos que conllevaría a un proceso de agotamiento del material disponible. Hudson (2003) estudiando secuencias de eventos en la parte baja de la cuenca del río Panuco (México), encontró que en los últimos eventos de la secuencia se produce un agotamiento del material a ser transportado, constituyendo el arrastre del material del lecho la fuente principal de sólidos en suspensión durante esos eventos.

Durante la estación de primavera se tomaron 2 eventos. El primero de ellos entre el 25-28 de marzo (evento 2) en respuesta a una precipitación débil de 18,8 mm y el segundo el 2 mayo (evento 3). Este último es el más pequeño de los 11 estudiados, tanto en la diferencia existente entre caudal inicial y máximo como en la concentración máxima de sedimentos, sin embargo pese a la escasa lluvia que lo generó y a la escasa precipitación antecedente, la concentración máxima de sedimentos es muy próxima a la registrada en el evento 9 con una precipitación total de 47,4 mm. La fuente de sólidos en suspensión en este caso (evento 3) es la escorrentía generada desde los suelos de cultivo de maíz (que en esta época del año están prácticamente desnudos).

Durante el mes de octubre se analizaron los eventos 4 y 5. El evento 4 (tomado los días 19 y 20), que se produjo como respuesta a una precipitación total de 47,4 mm, es el que presenta en términos de porcentaje un incremento mayor de caudal. En 10 horas se registraron 30 mm de precipitación y 5 horas más tarde se produjo el pico de caudal, manteniéndose aproximadamente durante una hora. Las concentraciones de sólidos en suspensión, con valores que oscilan entre 3 y 111 mg/L, son similares a las obtenidas en el evento 5, generado con una precipitación 6 veces menor, pero con un contenido de humedad antecedente 5 veces superior. Los contenidos de sólidos en suspensión en el evento 5 varían de forma muy rápida, pasando de 14 a 131 mg/L en tan solo una hora, lo que indica que se producen cambios significativos en la concentración de sólidos en las aguas de escorrentía en períodos de tiempo muy cortos, lo que debe considerarse en el diseño del muestreo de eventos.

Tabla 1. Características hidrológicas y concentración de sólidos en suspensión en los 11 eventos estudiados.

Evento	Fecha	Lluvia total (mm) y duración	I. máx. 10 min (mm/10 min)	Prec. antec. 5 días (mm)	Q máx. (m ³ /s)	Q in. (m ³ /s)	SS inicial (mg/L)	SS máx. (mg/L)	Coef. Var.SS (%)
1	28-30 dic. 04	22 (10 h)	1	31	0,58	0,17	5	530	69
2	25-28 mar. 05	18,8 (25 h)	2,6	24	0,48	0,28	4	141	57,5
3	2 may. 05	3,8 (2 h)	1,2	2,8	0,37	0,32	34	42	25
4	19-20 oct. 05	47,4 (29 h)	2,6	12,1	0,37	0,05	3	111	130
5	31 oct.-1 nov 05	7,8 (7 h)	2	60,8	0,35	0,20	3	131	105
6	2-3 nov. 05	51 (27 h)	2,6	77,6	0,65	0,24	14	474	92,9
7	8-9 nov. 05	31 (17 h)	6,2	20,2	0,38	0,14	4	88	91
8	12-14 nov. 05	42,8 (37 h)	3,8	33,6	0,47	0,20	8	78	89,5
9	25-28 nov. 05	47,4 (31 h)	2	0,6	0,36	0,12	9	44	36,7
10	1-3 dic. 05	44,6 (35 h)	2,6	31,4	1,12	0,23	14	626	134
11	29-30 dic. 05	22,4 (25 h)	1	13,8	0,50	0,20	13	294	114

En la tabla 1 se observa que las concentraciones máximas de sólidos en suspensión se obtienen en los eventos que alcanzan un caudal máximo más elevado, existiendo una relación estadísticamente significativa entre la concentración máxima de sólidos en suspensión y el caudal máximo. Así por ejemplo las concentraciones más elevadas de sólidos en suspensión con valores de 626 y 530 mg/l se registraron en los eventos 10 y 1 respectivamente con valores máximos de caudal de 1,12 y 0,58 m³/s. Por el contrario, las concentraciones más bajas, con valores de 42 y 44 mg/L, se obtuvieron en los eventos 3 y 9 en los que las condiciones hídricas antecedentes cabe calificarlas de secas.

En la figura 4, que representa la concentración de sólidos en suspensión frente al caudal para el conjunto de datos de los 11 eventos analizados, se advierte que a caudales por debajo de 0,5 m³/s la dispersión en las concentraciones de sólidos es baja mientras que a caudales mayores la oscilación es mucho más amplia. Se observa además que para el conjunto de datos se produce una relación positiva estadísticamente significativa ($r=0,75$).

En la tabla 2, en la que aparecen reflejadas las ecuaciones de regresión lineal entre el caudal (variable independiente) y la concentración de sólidos en suspensión (variable dependiente) para cada evento individual, se aprecia que se establecen relaciones positivas estadísticamente significativas (95%). Las mejores relaciones caudal-concentración, con

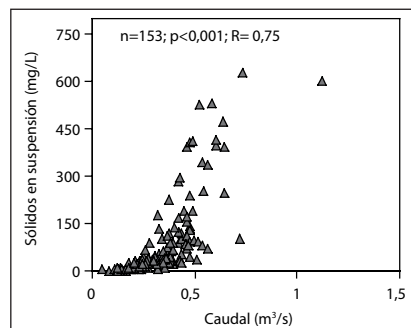


Figura 4. Relación entre concentración de sólidos en suspensión y caudal para el total de muestras de los 11 eventos estudiados.

Tabla 2. Ecuaciones de regresión para la relación caudal (Q) y concentración de sólidos en suspensión (SS) en cada evento analizado.

Evento	caudal- sólidos en suspensión
1	$R=0,82$ $SS = 1445,6Q - 374,68$
2	$R=0,76$ $SS = 401,01 - 93,75$
3	$R=0,52$ $SS = 153,76Q - 25,67$
4	$R=0,84$ $SS = 288,63Q - 36,26$
5	$R=0,77$ $SS = 511,08Q - 94,25$
6	$R=0,94$ $SS = 942,61Q - 234,36$
7	$R=0,71$ $SS = 232,2Q - 41,62$
8	$R=0,82$ $SS = 245,96Q - 60,967$
9	$R=0,64$ $SS = 120,24Q - 5,01$
10	$R=0,79$ $SS = 771,54Q - 262,22$
11	$R=0,87$ $SS = 1041Q - 211,95$

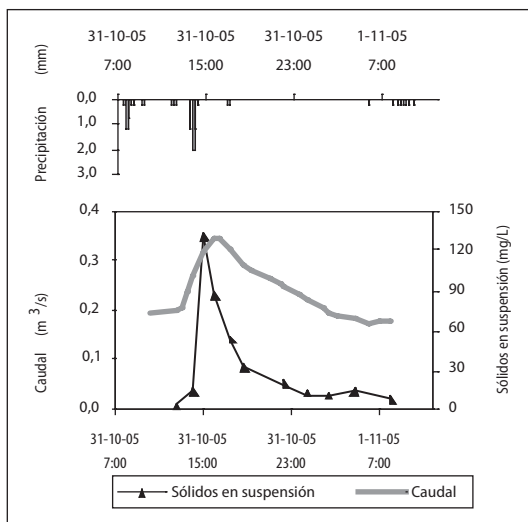


Figura 5. Hidrograma correspondiente al evento 5 (31 octubre- 1 noviembre).

valores de r del orden de 0,9 se obtienen para los eventos 6, 11. Los eventos en los que se obtienen las mayores concentraciones de sólidos en suspensión (10 y 1) presentan r con valores de 0,79 y 0,82 respectivamente.

En lo que se refiere al comportamiento hidrológico durante las crecidas por lo general se observa una respuesta rápida a la precipitación mientras que la recesión es más lenta especialmente en las avenidas de invierno cuando el flujo base es alto y el suelo está saturado (a modo de ejemplo en la figura 5 se presenta el hidrograma y el sedimentograma que resulta del evento 5).

En general las primeras muestras recogidas durante los episodios presentan un contenido bajo de sólidos en suspensión, cuyo

origen podría encontrarse en la removilización de los sedimentos del lecho del río. A medida que se incrementa el caudal también lo hacen los sólidos en suspensión de manera rápida, de forma que los picos de concentración de sólidos en suspensión bien preceden a los picos de caudal o se alcanzan con éstos, tal y como se puede observar en las figuras 5 y 7. El origen de estos sólidos en suspensión habría que buscarlo en las aguas de escorrentía generadas en los terrenos de cultivo cercanos al cauce y en los caminos forestales, que en algunos casos como los descritos por Reid Dunne (1984) son grandes productores de sedimentos.

En la mayoría de los eventos la relación entre las frecuencias acumuladas del caudal y carga de sólidos se aleja de la línea 1:1, como se puede observar en la figura 6, la cual muestra un ejemplo para los eventos 1 y 10. Caudales bajos presentan cargas más bajas de sólidos que la diagonal y viceversa. Esto es el resultado del mayor transporte de sólidos en las proximidades del pico de caudal. Aproximadamente 38% de la carga sólidos en el evento 1 y el 75% se producen en menos del 9 y 23% de tiempo respectivamente.

Al analizar la relación entre la descarga y los sólidos en suspensión para cada evento individual (figura 7) se observa un bucle de histéresis en sentido de las agujas del reloj, es decir, para un mismo caudal la concentración de sólidos fue superior en el limbo de ascenso que en el de descenso. Este tipo de bucle de histéresis, que ha sido descrito por numerosos autores bajo distintas condiciones climáticas y tamaños de cuencas (Steege et al., 2000, Sammori et al., 2004, Seeger et al., 2004, Lecce et al.,

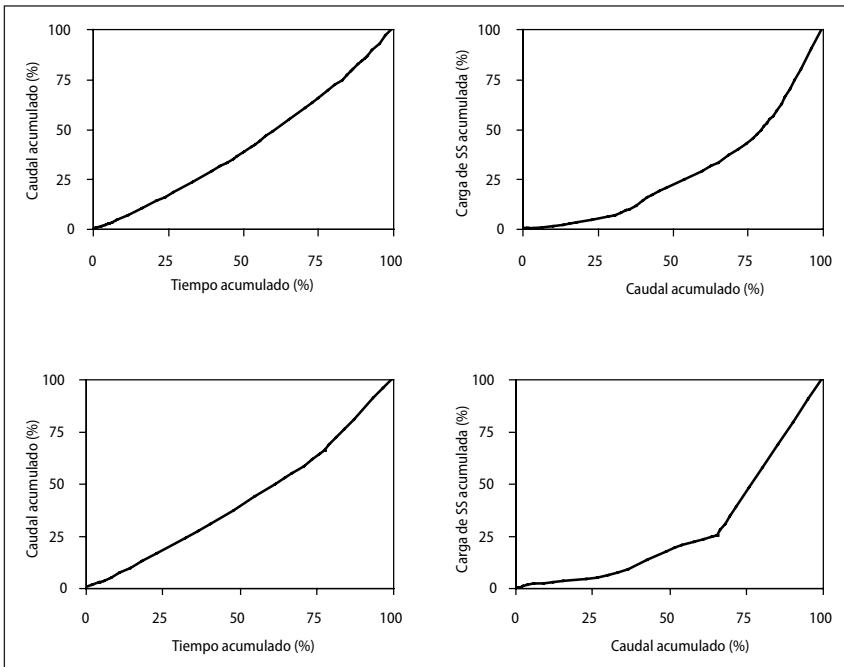


Figura 6. Frecuencia acumulada de caudal y porcentaje acumulado de caudal total en relación al porcentaje acumulado de carga de sólidos en suspensión para los eventos 1 y 10.

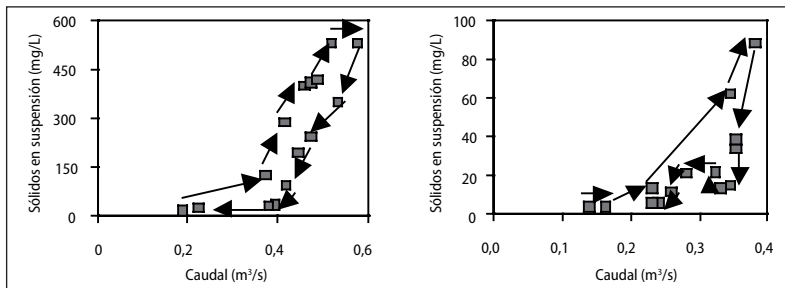


Figura 7. Relación entre descarga y concentración de sólidos en suspensión en los eventos 1 (28-30 diciembre de 2004) y 7 (8-9 noviembre de 2005).

- García Ruíz, J.M., Lasanta, T., Ruiz Flaño, P. (1995): "Changes in runoff and erosion as a consequence of land-use changes in the central Spanish Pyrenees". *Physics and Chemistry of the Earth*, 20 (3-4), 301-307.
- Guy, H.P. (1964): "An analysis of some storm-period variables affecting stream sediment transport". *U.S. Geological Survey Professional Paper*, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 462, pp. 1-46.
- Hudson, P. (2003): "Event sequence and sediment exhaustion in the lower Panuco Basin, Mexico". *Catena*, 52, 57-76.
- Jeje, L., Ogunkoya, O., Oluwatimilehin, J. (1991): "Variation in suspended sediment concentration during storm discharges in three small streams in upper Osun basin, central western Nigeria". *Hydrological Processes*, 5, 361-369.
- Klein, M. (1984): "Anti clockwise hysteresis in suspended sediment concentration during individual storms: Holberck catchment; Yorskire, England". *Catena*, 11, 251-257.
- Lecce, S., Pease, P., Gares, P., Wang, J. (2006): "Seasonal control on sediment delivery in a small coastal plain watershed, North Carolina, USA". *Geomorphology*, 73, 246-260.
- Llorens, P., Gallart, F. (1992): "Small basin response in a Mediterranean mountainous abandoned farming area: research design and preliminary results". *Catena*, 19, 265-284.
- Nearing, M., Govers, G., Norton, L.D. (1999): "Variability in soil erosion data from replicated plots". *Soil Science Society of American Journal*, 63, 1829-1835.
- Parga Pondal I. (1966): *Datos geológicos y petrológicos de la provincia de La Coruña*. Excma. Diputación Provincial de La Coruña.
- Reid, L., Dunne, T. (1984): "Sediment production from forest road surface". *Water Resources Research*, 20 (11), 1753-1761.
- Sala, M., Farguell, J. (2002): "Exportación de agua y sedimento en dos pequeñas cuencas mediterráneas bajo diferentes usos del suelo. Sistema Costero Catalán". *Revista C&G*, 16 (1-4), 97-109.
- Sammori, T., Yusop, Z., Kasran, B., Noguchi, S., Tani, M. (2004): "Suspended solids discharge from a small forested basin in the humid tropics". *Hydrological Processes*, 18, 721-738.
- Seeger, M., Errea, M.P., Beguería, S., Arnáez, J., Martí, C., García-Ruiz, J. M. (2004): "Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish Pyrenees". *Journal of Hydrology*, 288 (3-4), 299-311.
- Steegeen A., Govers, G., Nachtergaele, J., Takken, I., Beusenlink, L., Poesen, J. (2000): "Sediment export by water from an agricultural catchment in the Loam Belt of central Belgium". *Geomorphology*, 33, 25-36.
- Steegeen, A., Govers, G., Takken, J., Nachtergaele, J., Poesen, J., Merckx, R. (2001): "Factors controlling sediment and phosphorus export from two Belgian agricultural catchments". *Journal of Environment Quality*, 30, 1249-1258.
- Taboada, M.M., Diéguez, A., Taboada, M.T. (2005): "Alteraciones morfológicas asociadas a la formación de costras superficiales y su relación con la infiltración". *Actas del III Simposio Nacional sobre Control de la Degradación de Suelos*, Madrid, España, pp. 315-319.

- Válcarcel, M., Taboada, M.T., Paz, A., Dafonte, J. (2003): "Ephemeral gully erosion in northwestern Spain". *Catena*, 50, 199-216.
- Walling, D., Webb, B. (1983): "Patterns of sediment yield". In Gregory, K.J. (eds) *Background to Paleohydrology*. John Wiley and Sons, pp. 69-100.
- Williams, G. (1989): "Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers". *Journal of Hydrology*, 111, 89-106.
- Wood, P. (1977): "Controls of variation in suspended sediment concentration in the River Rother, West Sussex, England". *Sedimentology*, 24, 437-445.