

UN MÉTODO PARA EL MUESTREO AUTOMÁTICO EN AVENIDAS

*López Periago, Eugenio; Soto González, Benedicto; Rubinos González, David
y Díaz-Fierros Viqueira, Francisco*

Departamento de Edafología. Fac. de Farmacia. Univ. de Santiago. 15706 Santiago

SUMMARY

An alternative method for automatic sampling of floods

Automatic sampling of streamflow water in small watersheds is usually made in function of the water flow. This sampling method involves some problems of peak stream flow detection and distribution of samples, that may cause loss of accuracy on estimations of suspended solids discharge. An alternative sampling method is proposed, in which sample pacing is set to be proportional to the variation of streamflow discharge. An electromechanic device for transmitting a signal proportional to the absolute variation of streamflow discharge is shown. Comparison of the efficiency of the two sampling protocols is made on the basis of statistical criteria.

Different sampling patterns along streamflow events were simulated using both methods. Further analysis revealed that sampling made in function of streamflow variation is more selective than the flow-paced sample collection. That greater selectivity improves the distribution of collected samples along series of flood events and allows more accurate estimation of suspended solids discharge.

Key words: Autosampler, stream discharge, suspended solids.

RESUMEN

El muestreo automático de agua de escorrentía en pequeñas cuencas, se realiza habitualmente mediante tomamuestras programados para la adquisición de muestras distribuidas en función del caudal de escorrentía. Este tipo de muestreo presenta algunos problemas en la detección de picos de escorrentía, los cuales afectan a la estimación de descarga de sólidos en suspensión (SS).

En este artículo se propone un método alternativo de muestreo, que consiste en que la toma de muestras es realizada en función de la variación del caudal de escorrentía. A continuación se describe un sistema electromecánico para transmitir al tomamuestras una señal proporcional a la variación absoluta del caudal. Finalmente se compara mediante criterios estadísticos la eficiencia del nuevo método de muestreo frente al muestreo proporcional al caudal.

El análisis de muestreos simulados mediante los dos sistemas, realizados durante avenidas de escorrentía, reveló que el muestreo proporcional a la variación del caudal es más selectivo que el muestreo proporcional al caudal para la detección de picos de escorrentía, permitiendo una mejor distribución de las muestras a lo largo de avenidas sucesivas y una mejora de la estimación de la pérdida de sólidos.

Palabras clave: Muestreador automático, caudal de avenida, sólidos en suspensión.

INTRODUCCIÓN

Para el seguimiento de los procesos de transporte y los cambios de las propiedades fisicoquímicas en corrientes de aguas naturales, es necesario la obtención de muestras de agua representativas a las que se efectuarán los análisis fisicoquímicos.

El diseño de la estrategia de muestreo requiere un análisis detallado de las características del transporte en la cuenca de estudio. Los requerimientos de muestreo son mayores para el transporte de sólidos en suspensión (SS) que de sustancias disueltas, a causa de la mayor dependencia de estos respecto de la energía de arrastre de la corriente, es decir, del caudal.

Hasta hace poco tiempo, el muestreo de aguas en corrientes era una labor costosa que requería una vigilancia constante de la aparición de eventos. En muchas ocasiones es imposible el desplazamiento con suficiente rapidez para realizar el muestreo manual durante las avenidas (WALLING and WEBB, 1981).

En vista de estas dificultades, se han utilizado diversos tipos de mecanismos para la recolección de muestras durante la avenidas. Uno de ellos es el muestreador integrador que deriva una pequeña parte de flujo, aproximadamente proporcional al caudal, hacia un solo recipiente. Este procedimiento permite una adecuada estimación de la descarga total de sólidos, multiplicando la concentración de la muestra por el volumen total de descarga de la cuenca, pero tiene el inconveniente de no permitir un análisis temporal de los eventos y por tanto no es posible conocer las concentraciones máximas alcanzadas en un determinado momento; estas últimas son muy importantes en el análisis de la descarga de sustancias contaminantes con umbrales de toxicidad muy bajos (GALLART, 1992).

El instrumento para la recolección de muestras de uso generalizado en la actualidad es el muestreador automático o tomamuestras con memoria y microprocesador programable. Este aparato permite la recolección de muestras y su distribución en un número determinado de botellas, generalmente 24. El muestreo puede realizarse en modo discreto o integrado, controlado por el tiempo, por el caudal, o mediante una señal externa procedente de otro instrumento.

Sin embargo, el muestreador automático tiene un defecto en el procedimiento de muestreo proporcional al caudal, que consiste en que no responde a variaciones proporcionales respecto a un valor de caudal base, sino que lo hace en función de la variación de la escorrentía acumulada. Por tanto, es necesario ajustar periódicamente el factor de

proporción entre la velocidad de muestreo y el incremento del caudal. El muestreador, cuando funciona de este modo, acumula la esorrentía a caudales bajos durante largos periodos de tiempo. Esto significa que continuamente sigue tomando muestras aún en periodos de caudales bajos. Por ello, se hace necesario ajustar periódicamente el umbral mínimo para el comienzo de la integración del caudal.

Lo que se expone en este artículo es el resultado de la aplicación de un sistema alternativo de muestreo basado en un muestreo proporcional a la primera derivada de la esorrentía acumulada. Se describen los detalles de la construcción y funcionamiento, y a continuación, una evaluación comparativa de la eficiencia de este método respecto al protocolo proporcional al caudal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sistemas convencionales de muestreo de avenidas

El muestreo de avenidas mediante un protocolo de espaciamiento temporal está pensado para realizar un muestreo del agua a intervalos prefijados de tiempo y por lo tanto no es aplicable para aquellos casos en los que el objetivo es el muestreo de los pico de caudal, por ello no se considerará en este artículo. El funcionamiento del sistema proporcional al caudal es, salvo algunas diferencias en cuanto a la distribución de las muestras en las botellas, similar en todos los modelos disponibles en el mercado y consiste básicamente en un caudalímetro que suministra al tomamuestras una señal proporcional al caudal instantáneo. El tomamuestras realiza una integración en el tiempo del caudal instantáneo y por cada incremento de volumen acumulado, establecido en el programa de muestreo, efectúa la toma de una muestra.

La eficiencia del protocolo de muestreo proporcional al caudal es dependiente del valor del caudal base que se este considerando y depende también de la geometría del hidrograma. Además, como el número de botellas en el muestreador es limitado, es necesario introducir valores umbral para los que se inicie la integración del caudal. Incluso, estos valores límite es necesario modificarlos periódicamente en función del valor esperado del caudal basal. Dadas estas circunstancias, el muestreo proporcional al caudal puede llegar a ser muy eficiente si se conoce en detalle la respuesta hidrológica de la cuenca y se regulan cuidadosamente tanto los umbrales de inicio de la integración del caudal, como el factor de proporcionalidad para el inicio del cambio de muestra.

Sin embargo, cuando la respuesta hidrológica de la cuenca no es bien conocida, o tiene variaciones rápidas del nivel base, el ajuste de los parámetros en un sistema de muestreo proporcional al caudal presenta dificultades importantes. Este tipo de respuesta es típica de cuencas pequeñas en las que la capacidad de almacenamiento de la cuenca es menor y por lo tanto, el limbo de recesión es más abrupto.

El sistema proporcional a la variación del caudal

Para resolver las dificultades señaladas anteriormente respecto al muestreo temporal o proporcional al caudal, se desarrolló un sistema de muestreo proporcional a la variación del caudal. En principio se estudió la posibilidad de emplear un sistema de adquisición de datos y realizar un programa de cálculo de la derivada del flujo (fig. 1).

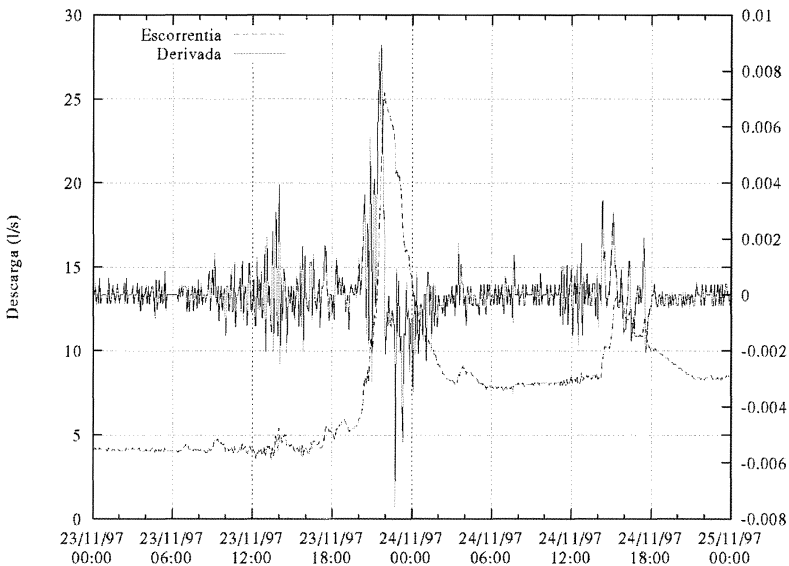


Figura 1. Hidrograma de una avenida (trazo discontinuo) y la derivada del caudal (trazo continuo).

Sin embargo, esto presentaba un problema consistente en que para realizar la derivación era necesario eliminar previamente el ruido de fondo del instrumento mediante un programa para la eliminación del ruido del tipo pasa-bajos (fig. 2), y esto no es posible si no se dispone del acceso a los registros almacenados anteriormente. En la actualidad los sistemas de adquisición de datos tienen un número de registros limitado que no permiten efectuar este cálculo.

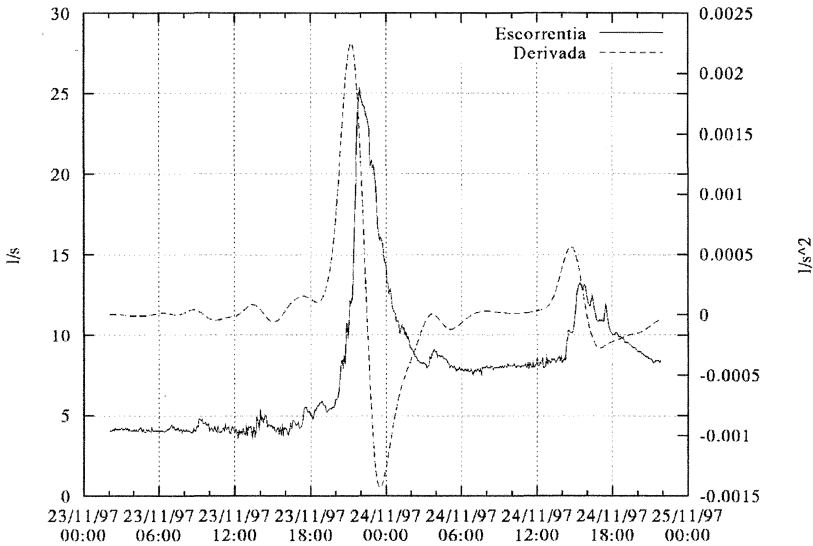


Figura 2. Hidrograma correspondiente a una avenida (trazo continuo) y la derivada del caudal filtrada (trazo discontinuo).

Otra posibilidad es el empleo de un ordenador, sin embargo, a menudo ocurre que existen limitaciones de suministro eléctrico o simplemente no se disponga de ordenador.

En el caso de la monitorización de la escorrentía de la cuenca de la finca O Abelar (Abegondo, A Coruña) se planteaban todos los problemas mencionados anteriormente, y por ello se ha buscado una alternativa consistente en un dispositivo que realiza la función de derivación del caudal acumulado.

Descripción de la cuenca experimental y del sistema de muestreo proporcional a la variación del caudal

La cuenca experimental en la que hemos situado el sistema de muestreo proporcional a la variación del caudal es una cuenca agrícola O Abelar de 10,7 ha, situada en el municipio de Abegondo (A Coruña) que presenta un 70% de su superficie dedicada a prados y la superficie restante esta cultivada con maíz forrajero.

La función del sistema de muestreo proporcional a la variación del caudal consiste en transmitir una señal proporcional a la variación del caudal, de forma que la velocidad de muestreo sea prácticamente nula mientras no se produzcan variaciones del caudal y que además la densidad del muestreo sea proporcional a la amplitud del pico de la avenida. Otro requerimiento consiste en que variaciones negativas del caudal han de ser contabilizadas como positivas para realizar el muestreo en el tramo descendente del pico del hidrograma (fig. 3).

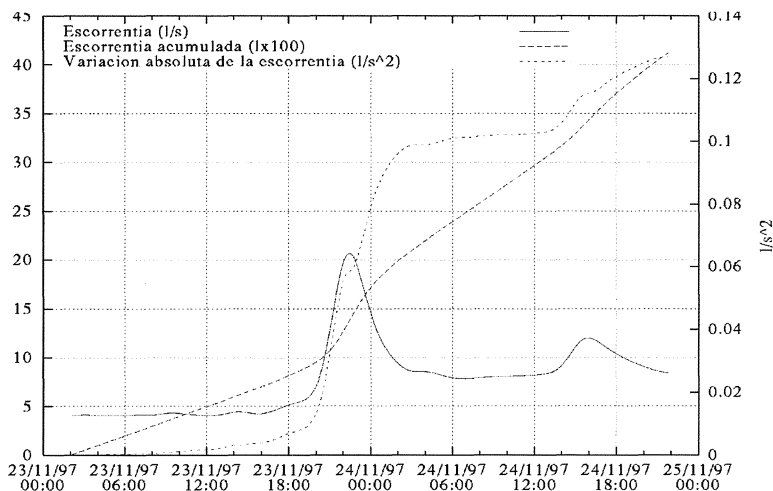


Figura 3. Escorrentía acumulada, flujo de escorrentía y valor absoluto de la variación del flujo de escorrentía.

El sistema que se ha ideado para realizar esta función es muy simple, consiste básicamente en un transductor que emite una señal proporcional a la variación del nivel en

el canal de aforo. Para simplificar el diseño del transductor, se ha aprovechado el sistema acumulador de impulsos con el que están dotados la mayoría de los muestreadores automáticos. Un esquema del aparato se expone en la figura 4.

El funcionamiento es el siguiente: las variaciones de nivel en el canal se transmiten a una roldana mediante un flotador con un contrapeso unidos a través de una correa dentada. Esta roldana está acoplada a un disco opaco provisto de ranuras que permiten el paso de un haz de luz infrarroja desde un diodo emisor a un detector. La rotación del disco alternativamente corta o permite el paso del haz. Un circuito electrónico realiza la función de regular la alimentación del diodo emisor y de amplificar la señal eléctrica del detector. La señal amplificada del detector es recibida por un circuito disparador o báscula electrónica que emite un pulso de corriente a partir de un determinado umbral de tensión. Finalmente este pulso activa el cierre de contactos de un relé de estado sólido. De este modo, las oscilaciones del nivel se transmiten como secuencias de pulsos.

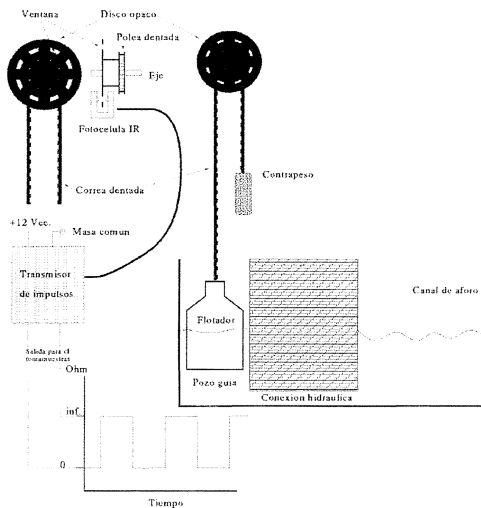


Figura 4. Esquema del aparato para la realización del muestreo proporcional a la variación del caudal.

El relé se conecta a la entrada auxiliar del contador de pulsos que tiene el tomamuestras y éste se programa en el modo de muestreo proporcional al caudal. El número de pulsos por muestra se calcula de acuerdo con la densidad de muestras deseadas para una amplitud de pico de caudal determinado. El número de muestras depende únicamente de la altura relativa del pico respecto al nivel base, siendo independiente de la duración del evento.

Uno de los inconvenientes de este sistema es que es sensible a las oscilaciones rápidas de nivel. Las turbulencias pueden ser contabilizadas como variaciones del caudal e iniciar el bombeo de una muestra. Para evitar este problema, es conveniente amortiguar las oscilaciones.

El método utilizado por los autores consiste simplemente en descentrar la correa del flotador respecto al eje del pozo guía donde se aloja el flotador, de esta forma el flotador roza con las paredes del pozo disminuyendo las oscilaciones. Otro sistema posible consiste en disminuir el diámetro la sección de la conexión hidráulica entre el canal y el pozo de medida, teniendo la precaución de que el crecimiento de algas o acumulaciones de sólidos no obturen dicha conexión.

El sistema ha demostrado ser fiable y el único inconveniente es el consumo de corriente que es de 200 mA cuando el relé está cerrado y aplicando una tensión de alimentación de 12 Vcc. Este es un problema menor que se puede corregir mediante el empleo de un circuito de menor consumo, que prescindiera del relé.

RESULTADOS

Comparación de la eficiencia del tipo de muestreo

En la figura 5 se exponen los dos sistemas de muestreo considerados, el muestreo proporcional al caudal y el proporcional a la variación de l caudal.

Para el muestreo proporcional al caudal (no utilizado en nuestra cuenca experimental) se ha simulado una secuencia de muestreo optimizando la frecuencia, obteniéndose un valor de una muestra cada 50 m³ para la obtención de un registro de 24 muestras en el periodo expuesto en la figura 5. En el muestreo proporcional a la variación del caudal también se ha optimizado para la finalización de las 24 muestras durante el mismo periodo, resultando una frecuencia de muestreo de 0,005 s⁻¹.

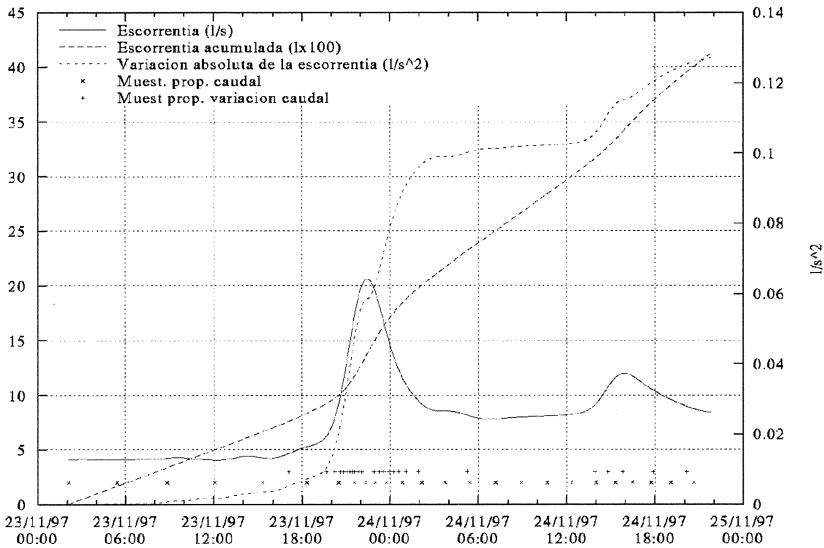


Figura 5. Hidrograma correspondiente a una avenida, la integral del flujo y la derivada del caudal acumulado. Los momentos de toma de muestra para cada uno de los sistemas de muestreo están representados por símbolos.

Se comprueba que existe una diferente selectividad del muestreo, siendo el muestreo proporcional al caudal menos selectivo que el proporcional a la variación del caudal. En el muestreo proporcional al caudal se toman 8 muestras correspondientes a picos, mientras que en el proporcional a la variación del caudal durante el mismo intervalo, el número de muestras tomadas es 18, por tanto, la densidad del muestreo es superior al doble durante este evento.

En los eventos registrados en la cuenca de la finca O Abelar, entre el 80% y el 60% de la masa total de los sólidos en suspensión es transportada antes de que se alcance el máximo de escorrentía o caudal pico. La concentración máxima de sólidos generalmente se detecta cuando el caudal de escorrentía en el tramo ascendente del hidrograma alcanza 70% del caudal pico (fig. 6). Estos resultados están en concordancia con los límites observados por otros autores en cuencas agrícolas de similar tamaño, entre 7 y 17 ha (ALLEN, 1981). A partir de estas observaciones, se justifica el aumento de densidad del muestreo en los picos de escorrentía, especialmente en el tramo ascendente.

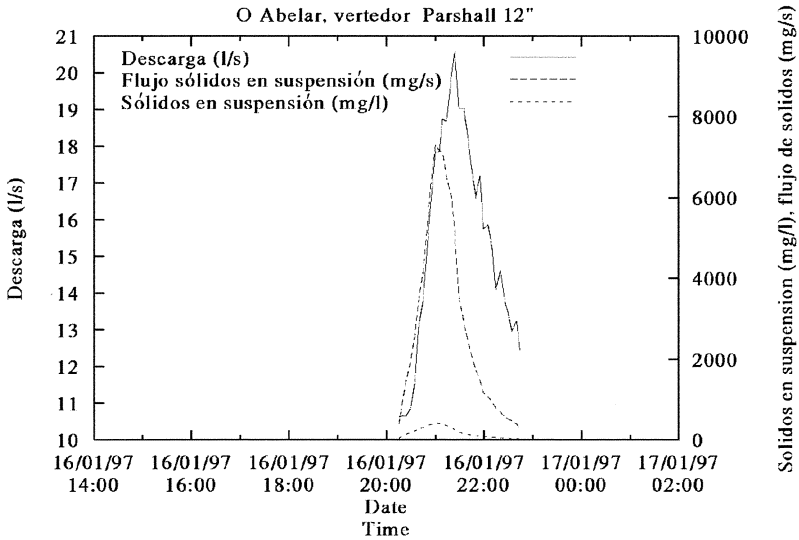


Figura 6. Hidrograma correspondiente a una avenida, concentración de sólidos y flujo de sólidos en la cuenca O Abelar.

Otra consideración es el número de muestras que se consumen previamente al evento cuando se emplea el muestreo proporcional al caudal. En el muestreo representado en la figura 5, el inicio de la cuenta de pulsos se realiza a la media noche del día 22 y la primera muestra se recoge a las 5 de la madrugada del día 23. Sin embargo, en un muestreo real, el inicio de la cuenta no se puede establecer a priori. La cadencia de muestreo con el caudal basal anterior al primer pico del evento es de una muestra cada 3 horas y 30 minutos, con esta cadencia se consumirían las 24 botellas en 3,5 días; por lo que cualquier evento que suceda después de ese tiempo no sería muestreado.

Para evitar este problema, los tomamuestras automáticos disponen de una entrada externa para la inhibición del inicio del muestreo, normalmente esta señal proviene de un interruptor de flotador o de un caudalímetro; estos dispositivos permiten establecer un valor límite para el caudal a partir del cual se realiza el muestreo y por debajo se interrumpe.

Suponiendo que en la secuencia expuesta en la figura 5 se fije el umbral a partir de un caudal de 5 l/s (18 h del día 23), la primera muestra se tomaría cuando el caudal alcan-

zase 10 l/s es decir, cuando el caudal llegase 2/3 del caudal pico, y la segunda, en el máximo de caudal. Se tomarían únicamente dos muestras durante el tramo ascendente del pico, o bien tres muestras si se activa la opción de tomar una muestra en el inicio de la cuenta, a los 5 l/s. Se podría deducir que sería conveniente duplicar la densidad del muestreo a 25 m³, con eso se tomarían de cuatro a seis muestras en el tramo de ascensión del caudal, que es un número aceptable. Sin embargo, surge un nuevo problema consistente en que el carrusel de botellas se completaría 15 horas después, a las 9 h del día 24, sin posibilidad de muestreo de un pico posterior.

Comparación de los muestreos

La comparación de la eficiencia se realiza mediante la simulación de estrategias del muestreo sobre un evento registrado en una cuenca ubicada en la granja O Abelar. La carga de sólidos en suspensión se interpola para cada uno de los tiempos en los que se registra el caudal durante el evento para la obtención de pares de datos (caudal y concentración de sólidos).

Una vez obtenidos los pares es posible efectuar tres pruebas de ajuste: coeficiente de masa residual (Ec. 1), raíz del error cuadrático medio (Ec. 2) y eficiencia del modelo (Ec. 3).

$$CMR = \frac{\sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n \hat{x}_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (1)$$

$$RECM = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2}}{n\bar{X}} \quad (2)$$

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \quad (3)$$

Cuando los tiempos en los que se realiza la toma de una muestra no coinciden con los tiempos de adquisición del registrador, es necesario realizar una interpolación de los valores de carga de sólidos en suspensión para los tiempos en los que se registra el caudal u otra variable. Este procedimiento es especialmente útil para el cálculo de pérdida

total de sedimentos en el evento, pero en este caso, para la comparación de los sistemas de muestreo, también es necesario minimizar el error numérico en la interpolación.

Para disminuir el efecto del error numérico de interpolación se utilizó un método de interpolación polinómica. Se han escogido el algoritmo de FRITCH (1982) que está expresado en dos subrutinas (PCHIP Y PCHFE) que se encuentran disponibles en la librería matemática SLATEC. La subrutina PCHIP se ha empleado para calcular las derivadas necesarias para determinar la representación del polinomio interpolante correspondiente a los datos observados. La subrutina PCHFE se utilizó para interpolar a partir del polinomio y del vector de tiempos para los que se pretenden obtener los datos interpolados.

En las figuras 7 y 8 se comparan los histogramas para la integración del flujo de sólidos en suspensión y el pico de sólidos para cada uno de los dos tipos de muestreo. Se puede observar en la figura 7 (muestreo proporcional al caudal) que los errores en la estimación de la masa de sólidos en suspensión perdida es muy grosera. Por contra, en la figura 8 en la que se representa el resultado a partir del muestreo proporcional a la variación del caudal, la estimación es mucho más precisa.

La interpolación de los valores de concentración de sólidos en suspensión mejora sustancialmente la estimación del balance de sólidos durante los eventos. En la tabla 1 se comparan los dos procedimientos de muestreo respecto a un pico de sedimentos sintético elaborado a partir de los registros obtenidos en la cuenca de O Abelar. Los datos de concentración de sólidos en cada muestra se interpolaron para los tiempos de adquisición del caudal, y posteriormente se integraron en función del caudal. La estimación del flujo de sólidos durante el evento a partir de las concentraciones interpoladas se muestra en la Figura 9.

El coeficiente de masa residual indica que la cantidad de sólidos en suspensión transportados durante el evento es sobreestimada en un 37% cuando se efectúa un muestreo proporcional al caudal, mientras que en el proporcional a la variación del caudal la sobreestimación es menor del 3%. La eficiencia del muestreo en el caso del muestreo proporcional al caudal es 0,12 (cuando el valor de este indicador es menor de 0,5 el muestreo ha de ser rechazado). La raíz del error cuadrático medio, que indica la dispersión alrededor de los datos reales en un rango 1-0, también revela que el muestreo proporcional al caudal ofrece unos resultados deficientes.

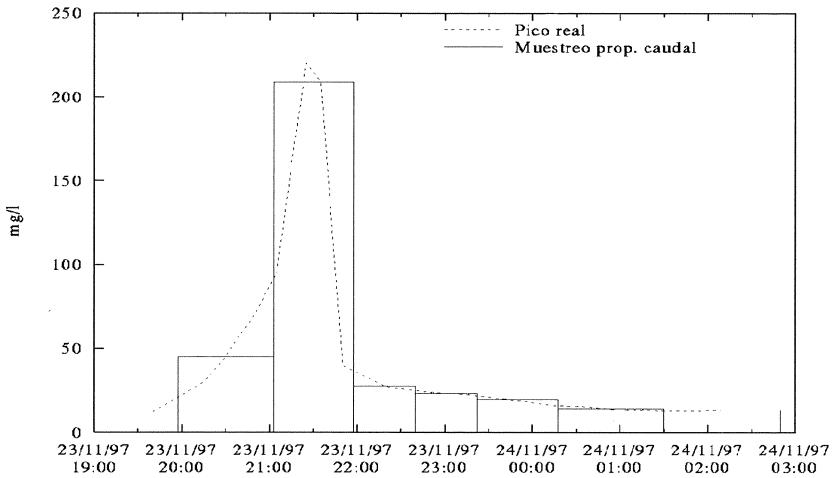


Figura 7. Pico de concentración de sólidos y su correspondiente histograma obtenido mediante el método de muestreo proporcional al caudal.

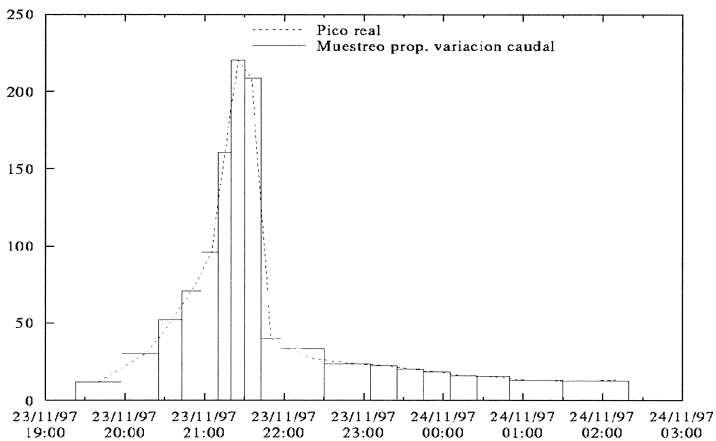


Figura 8. Pico de concentración de sólidos y su correspondiente histograma obtenido mediante el método de muestreo proporcional a la variación de caudal.

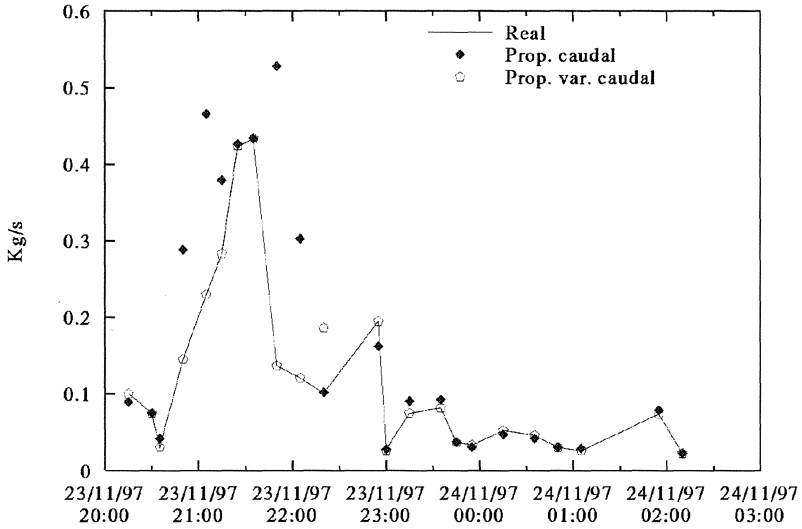


Figura 9. Flujo de sólidos durante un evento (línea) y estimación del mismo a partir de los dos tipos de muestreo (símbolos).

	a	b
n (interpolados)	23	23
r	0,81	0,99
r ²	0,65	0,99
Error máximo (kg)	117	25
Eficiencia del muestreo	0,12	0,97
Raiz del error cuadrático medio	0,19	0,031
Coefficiente de masa residual	0,37	0,028

Tabla 1. Efectividad del muestreo proporcional al caudal (a) y proporcional a la variación del caudal (b) en la estimación del flujo de sólidos.

CONCLUSIONES

El método de muestreo proporcional al caudal de escorrentía presenta algunos problemas para la selección de los tiempos de muestreo de avenidas en pequeñas cuencas, donde la respuesta hidrológica es rápida. Este problema está ligado a la poca selectividad de este tipo de muestreo respecto a los picos de escorrentía, y a la variación rápida del caudal basal.

El método propuesto para realizar muestreos más selectivos, basado en una pauta proporcional a la variación del caudal, ha resultado ser significativamente más selectivo tras efectuar la comparación de simulaciones basadas en ambos tipos de muestreo.

Los mejores resultados en todas las pruebas indican que el muestreo proporcional a la variación del caudal realizado en series de eventos, proporciona mejores estimaciones de los valores reales de pérdidas de sedimentos, que el muestreo proporcional al caudal.

En vista de los mejores resultados obtenidos mediante este nuevo sistema, se ha desarrollado un dispositivo para transmitir una señal a un tomamuestras automático que es proporcional a la variación absoluta de caudal.

AGRADECIMIENTOS: Este trabajo ha sido financiado por la Unión Europea a través del proyecto "Effective Land Management for Surface Runoff Control" (FAIR 1-CT95-0458).

BIBLIOGRAFÍA

- ALLEN, P. B. (1981). Measurement and prediction of erosion and sediment yield. *USDA Agricultural Reviews and Manuals, Southern Series*, 15: 1-23.
- FRITCH, F. N. (1982). Code for interpolation. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California.
- GALLART, F. (1992). Medida de flujos de agua y sedimentos a escala de pequeña cuenca. En: *Seminario teórico-práctico de métodos para el estudio de procesos de erosión*. CSIC. Madrid, Barcelona y Zaragoza.
- WALLING, D. E. and WEBB, B. W. (1981). The reliability of suspended sediment load data. In: *Erosion and Sediment Transport Measurements*. IAHS publ. Nº. 133: 177-194.