



INCO-CT2004-510739

## **EPIC FORCE**

### **Evidence-based Policy for Integrated Control of Forested River Catchments in Extreme Rainfall and Snowmelt**

Instrument: Specific Targeted Research Project

Thematic Priority: Specific Measures in Support of International Cooperation,  
Developing Countries, A.2 Rational Use of Natural resources, A.2.1 Managing humid  
and semi-humid ecosystems

### **Capacity Building Document**

### **Medición del transporte de sedimentos y curvas de descarga de sedimentos**

# Medición del transporte de sedimentos y curvas de descarga de sedimentos.

**Autor**                    **Dr. J.C. Bathurst**  
(Universidad de Newcastle upon Tyne, Reino Unido)

**Traducción al español**                    **M.D. Montagnini, Ing. M.L. Amsler**  
(Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina)

## Contenidos

	<i>Objetivos e introducción</i> .....	2
1	¿Qué es el sedimento? .....	2
2	Clasificación del transporte de sedimentos .....	3
	Clasificación según el origen; clasificación según el mecanismo de transporte; la carga total.	
3	Clasificación de tipos de sedimento .....	4
4	¿Por qué son necesarias las mediciones de transporte de sedimentos? .....	5
5	Medición del transporte de la carga en suspensión .....	5
	Características de un buen captador; tipos de captadores; análisis de laboratorio.	
6	Medición del transporte de la carga de fondo .....	8
	Características de un buen captador; tipos de captadores.	
7	Medición de la distribución de tamaños de sedimentos del lecho .....	12
	Tipos de muestras; análisis de laboratorio.	
8	El principio de la curva de descarga de sedimentos .....	13
9	Cálculo de la producción de sedimentos .....	15
10	Fuentes de error .....	16
	Origen del sedimento; variación durante un evento de crecida; eventos de escurrimiento con picos múltiples; variaciones estacionales.	
11	Uso de las curvas de descarga de sedimentos.....	18
	<i>Resumen</i> .....	19
	<i>Referencias</i> .....	19

## Objetivos e introducción

### Objetivos

Cuando haya completado este documento, usted podrá:

- comprender por qué es necesario realizar mediciones de transporte de sedimentos;
- identificar cómo se clasifican los sedimentos transportados por los ríos, de acuerdo a su origen, al mecanismo de transporte y al tamaño de las partículas;
- conocer distintos aspectos requeridos para la medición del transporte de las cargas en suspensión y de fondo;
- conocer las características deseables en un buen captador de sedimentos;
- reconocer los instrumentos necesarios para realizar mediciones de carga suspendida y de fondo;
- comprender las bases de las técnicas de medición del transporte de la carga suspendida y de fondo;
- conocer cómo determinar el caudal sólido a partir de datos de campo;
- distinguir diferentes procedimientos para la medición de la distribución de tamaños del material de fondo;
- entender el concepto de la curva de descarga de sedimentos y cómo es utilizada para calcular la producción de sedimentos;
- conocer cómo se obtiene la curva de descarga de sedimentos;
- comprender las aproximaciones y fuentes de errores asociadas con las curvas de descarga;
- saber determinar la producción de sedimentos utilizando una curva de descarga;
- conocer las circunstancias bajo las cuales las curvas de descarga de sedimentos pueden ser aplicadas con confiabilidad.

El presente documento describe los instrumentos y técnicas para la medición en campo del caudal de sedimentos en suspensión, de la carga de fondo y de la distribución de tamaños del material constitutivo del lecho, como medios de obtener datos para verificar y desarrollar ecuaciones de transporte.

Sobre la base de los conceptos de curvas de descarga y de duración de caudales, también se introduce el uso de curvas de descarga de sedimentos para determinar la producción de sedimentos, para casos en los que no hay mediciones disponibles.

## 1 ¿Qué es el sedimento?

A los fines del presente documento, se define a los **sedimentos** como los productos resultantes de los procesos de erosión de la superficie del suelo (por ejemplo, en campos o en laderas de montañas) y del fondo de los ríos y sus márgenes. Los materiales resultantes de la erosión de la superficie del suelo ingresan a los ríos ya sea cayendo, rodando o acarreados hasta allí por la acción de diversos agentes como la escorrentía superficial, el viento y las actividades humanas.

Generalmente se considera al sedimento constituido por partículas sólidas o material fragmentado inorgánico, como arcilla, arena o grava. Pero en el

presente documento no se consideran como sedimento materiales orgánicos, disueltos o en solución.

El **transporte de sedimento fluvial** refiere al movimiento del sedimento debido al flujo de agua en ríos o canales. Se cuantifica como caudal sólido, por medio de su peso seco o volumen, expresado en unidades de  $\text{kg s}^{-1}$  o  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ .

La concentración de sedimento en el agua se puede medir como la relación entre el peso seco de las partículas y el peso total o volumen de la mezcla agua-sedimento, expresada en unidades de  $\text{mg l}^{-1}$  o partes por millón (ppm). El transporte se produce por diferentes mecanismos, dependiendo de la energía del flujo y del peso o tamaño de los sedimentos.

## 2 Clasificación del transporte de sedimentos

El transporte de sedimentos puede clasificarse según el origen del material y los mecanismos mediante los cuales se produce.

### 2.1 Clasificación según el origen

El sedimento que se transporta en cualquier tramo de un río proviene de dos orígenes principales:

- **carga de material del fondo:** la parte del caudal sólido total que se compone de partículas del tamaño de las que se hallan en el fondo del mismo río;
- **carga de lavado:** la fracción del caudal sólido total compuesta por partículas de tamaños menores que las que constituyen el fondo del río; está condicionada por la disponibilidad y suministro de los productos de la erosión que afectan las márgenes y las áreas de pendiente pronunciada, aguas arriba del sitio considerado. La carga de lavado, en general, presenta una pobre correlación con el caudal líquido debido a su dependencia de la disponibilidad de material que proviene de zonas de suministro externas al río.

No existe una división abrupta entre las dos cargas en términos del tamaño del sedimento, pero el diámetro de partícula de 0,0625 mm (límite entre arena y limo) se cita habitualmente como el tamaño divisorio.

### 2.2 Clasificación según el mecanismo de transporte

El sedimento se transporta mediante dos mecanismos dominantes:

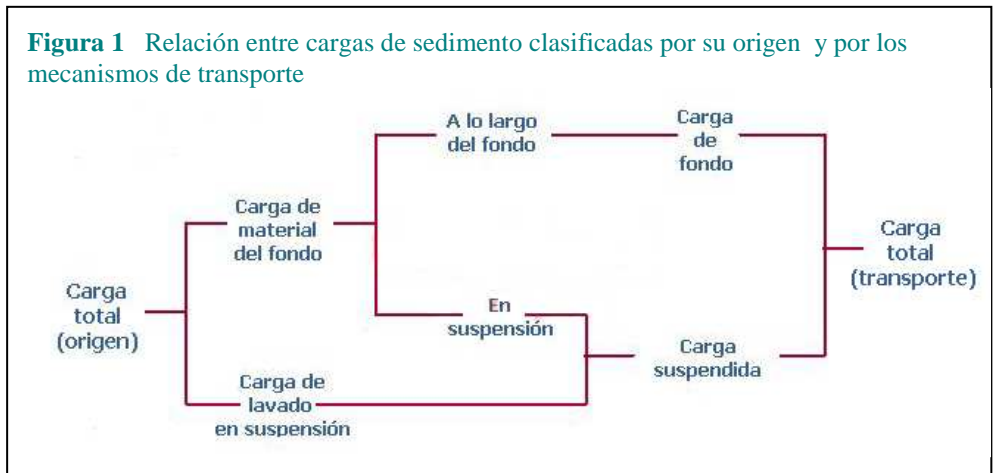
- **carga de fondo:** sedimento que se mueve en contacto con el fondo por saltación (movimiento constituido por una sucesión de saltos y rebotes, característico del transporte de arenas), rodamiento o deslizamiento. Típicamente, es el material más grueso que se transporta;
- **carga suspendida:** el sedimento que se sostiene en el seno del fluido por la acción de las componentes ascendentes de las corrientes turbulentas y permanece en suspensión durante un tiempo considerable. Es el material más fino que se transporta.

La carga de fondo es aproximadamente el 5-25% de la carga suspendida para grandes ríos de profundidad considerable. Sin embargo, puede igualar o

exceder la carga suspendida en ríos de montaña, más pequeños, con fondos de gravas y cantos rodados.

### 2.3 La carga total

La suma de la carga de material de fondo y la carga de lavado constituye la carga total. De igual manera, la combinación de la carga de fondo y carga suspendida constituye la carga total. Las relaciones entre las cargas de material de fondo y de lavado, y las cargas de fondo y suspendida se muestran en la *Figura 1*.



**Nota:** no se debe confundir la carga de fondo con la carga de material de fondo. En tanto tienen sedimentos en común, refieren a diferentes criterios de clasificación del transporte de sedimentos.

## 3 Clasificación de tipos de sedimento

El sedimento puede clasificarse mediante el uso de términos como *arcilla* y *arena*. Estos vocablos de uso extendido tienen una aplicación generalizada fuera del vocabulario científico, pero refieren a rangos de tamaño específico para la ciencia. Se conoce una gran cantidad de criterios de clasificación, difiriendo unos de otros en cuestiones de menor consideración. De estas clasificaciones, se presenta una típica en la *Tabla 1*.

Los materiales más finos de las fracciones arcilla y limo presentan comportamiento cohesivo -lo que implica que las partículas individuales tienen la propiedad de “adherencia”-. Pueden “adherirse” unas con otras para formar partículas de mayor tamaño, proceso que se conoce como floculación. Los contaminantes son preferentemente adsorbidos por las partículas de tamaños menores del sedimento, las que de esta manera proveen un importante mecanismo para su transporte.

Rango de tamaño (mm)	Tipo	Características
0,00024 - 0,004 0,004 - 0,062	Arcilla Limo	Cohesivo. Se mueven en suspensión. Constituyen la carga de lavado.
0,062 - 2	Arena	No cohesivo. Se mueven como carga suspendida y de fondo. Forman la carga de material de fondo (en algunos casos, también carga de lavado).
2 - 64 64 - 250 250 - 2000	Grava Guijarros Cantos rodados	No cohesivo. Se mueven como carga de fondo. Forman la carga de material de fondo.

**Tabla 1** Una clasificación posible de tipos de sedimento.

## 4 ¿Por qué son necesarias las mediciones de transporte de sedimentos?

Las mediciones se efectúan para determinar directamente la carga de sedimentos, para establecer o verificar relaciones analíticas o empíricas para el cálculo de la carga de sedimento (por ejemplo, ecuaciones de transporte de sedimento o curvas de descarga) y para calibrar y validar modelos de transporte de sedimento físicos y numéricos. Son ejemplos de situaciones en las que se requiere efectuar mediciones: la predicción de la tasa de sedimentación en un embalse o presa proyectados, la estimación de la velocidad de atascamiento de plantas de suministro de agua y canales de irrigación, el control del efecto que producen los cambios en el uso del suelo sobre los ambientes fluviales, y la verificación de un modelo de transporte de sedimentos a lo largo de una red fluvial.

Las técnicas e instrumentos necesarios para las mediciones varían según el tipo de transporte y de río. En particular, se utilizan distintos procedimientos para la medición del **transporte de carga en suspensión y de fondo**. Sin embargo, puede resultar difícil definir el límite entre los dos tipos de carga, y existe la posibilidad que el captador utilizado para la carga de fondo tome una parte de la carga en suspensión (conocido como problema de la doble captura). La suma de las cargas medidas de fondo y suspendida proporciona una estimación de la carga total.

## 5 Medición del transporte de la carga en suspensión

La concentración del sedimento suspendido varía en la dirección vertical, incrementándose fuertemente cerca del fondo. El tamaño de las partículas también aumenta hacia el fondo. El perfil resultante de concentración depende del tamaño de las partículas y de la velocidad e intensidad de la turbulencia.

Los tamaños más pequeños se distribuyen de manera aproximadamente uniforme en la vertical (por ello la carga de lavado aparece uniformemente distribuida en la mayoría de las situaciones). En cambio, los tamaños mayores de partículas presentan un perfil de concentración sesgado en la región próxima al fondo (ver *Figura 2*).

Para determinar el transporte de la carga suspendida, se debe medir la **concentración de sedimentos  $C$**  y luego calcular la **descarga sólida en suspensión** como  $CQ$ , donde  $Q$  es el caudal líquido. En una sección transversal es necesario obtener muestras de varios puntos, tanto en dirección lateral como vertical, e integrar los resultados a lo ancho de la sección para determinar un valor promedio, dado que la **carga suspendida de material de fondo** no se distribuye uniformemente (como la velocidad del flujo) (ver

**Figura 2** Variación vertical de la concentración de sedimentos suspendidos para tamaños seleccionados de partículas en un flujo dado

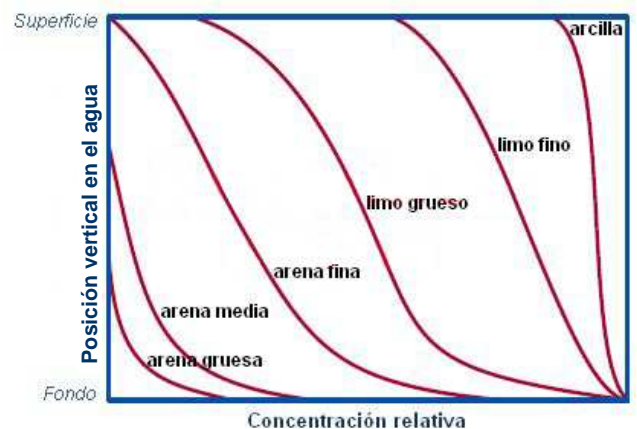
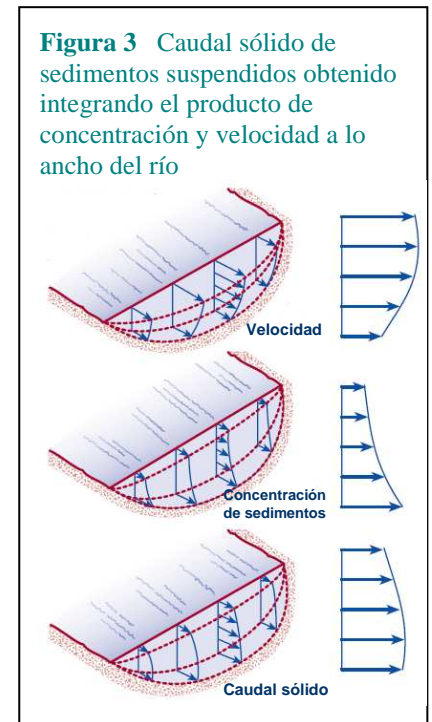


Figura 3). La concentración de sedimentos también varía con el tiempo, según pulsos de sedimento alternados con intervalos de menor concentración. Por lo tanto, la toma de muestras debe realizarse a lo largo de períodos suficientemente largos para que esas fluctuaciones se promedien entre sí.

Dado que la mayor parte del transporte de sedimentos ocurre asociada a los caudales altos, es esencial que las muestras se obtengan durante esos períodos cuando se intentan establecer promedios a largo plazo. Se requiere tomar mayor número de muestras cerca de la ocurrencia del caudal pico, de modo que permitan fijar bandas de error; durante los períodos de caudales bajos o estacionarios, es suficiente una cantidad menor de muestras. Sin embargo, los esquemas de muestreo que se planifiquen generalmente requieren de un compromiso entre la precisión exigida y limitantes prácticas, tales como tiempo y costo de la operación.

Los muestreos de rutina habitualmente se realizan en los mismos lugares seleccionados para la medición de caudales líquidos. De todos modos las muestras deberán ser obtenidas aguas arriba de zonas de aguas quietas (lagunas) o de muy baja velocidad, ya que estas podrían actuar como trampas de sedimentos. Las muestras captadas deberán permitir representar la distribución de material en suspensión a lo ancho de la sección, lo que se puede lograr tomando muestras en varios puntos de la misma. Alternativamente, se puede aprovechar la mezcla que se produce en zonas de alta turbulencia, como las hoyas al pie de saltos de agua. Todos los tamaños de partículas se encuentran uniformemente presentes en suspensión, por lo tanto una muestra única puede proporcionar la medida de la concentración promedio en el flujo con razonable exactitud.



### 5.1 Características de un buen captador

- Origina mínima perturbación del flujo y los sedimentos. Esto es posible mediante un diseño hidrodinámico, y el uso de una boquilla pequeña de entrada de la mezcla agua-sedimento. Se requiere la existencia de un orificio que permita la salida del aire del interior del recipiente captador para asegurar que la velocidad de ingreso a través de la boquilla sea aproximadamente igual a la velocidad de la corriente.
- Evita errores en la concentración medida debidos a las fluctuaciones en cortos períodos de tiempo. Esto se logra tomando la muestra durante un intervalo de tiempo adecuado.
- Proporciona resultados que pueden relacionarse con la velocidad (o caudal), para determinar el caudal de carga en suspensión.

### 5.2 Tipos de captadores

- Un captador **instantáneo** atrapa en un intervalo muy corto de tiempo un cierto volumen de la mezcla agua-sedimento. Es útil en estudios oceanográficos y en lagos donde las velocidades y fluctuaciones turbulentas son bajas.
- Un captador **integrador** toma un cierto volumen de la mezcla agua-sedimento a lo largo de una distancia o período de tiempo.
  - *Integrador puntual*: obtiene la muestra en un punto, integrando a través de un período de tiempo para promediar las fluctuaciones turbulentas.

- **Integrador en profundidad:** se mueve a velocidad constante en la vertical, integrando en profundidad. Se hace descender el captador a través de la corriente a velocidad vertical constante hasta alcanzar el fondo; luego se sube a velocidad constante hasta la superficie. El resultado es una muestra integrada cuya cantidad en cualquier profundidad está proporcionalmente relacionada con la velocidad (o caudal) en esa profundidad. La duración de la operación se determina por el tiempo requerido para casi llenar la botella del captador, y se puede obtener a partir de las curvas de velocidad de llenado para la boquilla particular que se utilice, en caso de ser conocida la velocidad del escurrimiento. En general, la velocidad de descenso del equipo de muestreo no debe exceder el 40% de la velocidad media del flujo, para evitar que se formen ángulos pronunciados entre la boquilla y el flujo de aproximación. En una sección transversal al escurrimiento se obtiene un determinado número de muestras a partir de las cuales se determina la carga de sedimentos suspendidos total en dicha sección.

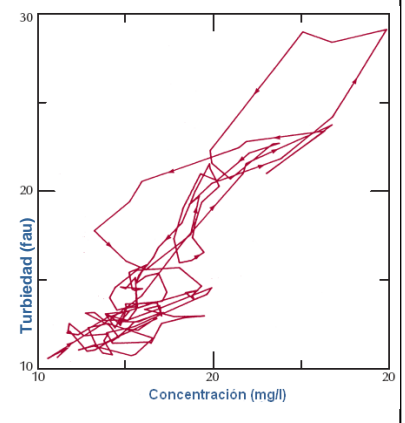
El **captador US DH-48** es el instrumento estándar para corrientes vadeables con caudales específicos inferiores a  $1 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  (ver *Figura 4*). Consiste en una estructura (o camisa) con diseño hidrodinámico, que contiene una botella de leche y se opera con una barra de vadeo. Se dispone de otras versiones del mismo captador aptas para corrientes más profundas y veloces, que son usadas desde un cablecarril.

**Figura 4** Captador de sedimentos en suspensión integrador en profundidad



- Con un captador de **registro continuo** el objetivo es registrar los cambios a través del tiempo de la concentración de sedimentos en suspensión. Sin embargo, no es posible medir directamente la concentración de un modo continuo. Las mediciones más típicas que se realizan, por lo tanto, se basan en cambios en la intensidad de la luz, de la conductividad eléctrica o del sonido, que luego se correlacionan con la concentración de sedimentos. (Esto es análogo al procedimiento que utiliza la curva altura-caudal para determinar la descarga líquida de un modo continuo.) El instrumento más utilizado generalmente es el **medidor de turbiedad** o “turbidímetro”, cuyo funcionamiento se basa en la suposición que el agua con alta concentración de sedimentos es menos transparente. La **turbiedad** es una medida de esta propiedad óptica que inhibe la transmisión de la luz a través de la mezcla agua-sedimento por los fenómenos de dispersión y absorción. Se mide mediante una célula fotoeléctrica. Los turbidímetros de atenuación miden la pérdida de intensidad de un rayo delgado paralelo que pasa a través de una longitud conocida en la mezcla agua-sedimento. Estos instrumentos suelen subestimar el efecto de atenuación. Los turbidímetros nefelométricos miden la luz dispersada en un cierto ángulo (habitualmente de  $90^\circ$  o  $180^\circ$ ) con respecto al rayo emitido; son los dispositivos predilectos para medir turbiedad. Los registros resultantes necesitan ser calibrados contra valores medidos puntuales de concentración antes de que puedan ser transformados en un registro continuo (véase *Figura 5*). Es probable que esta calibración se modifique con el paso del tiempo, y debe tenerse en cuenta que la medición con célula fotoeléctrica es afectada por otros factores adicionales a la turbiedad.

**Figura 5** Relación entre turbiedad y concentración de sedimentos. Geebung Creek (79,6 ha), New South Wales, Australia, 23-30/10/85. Las flechas indican variación con el tiempo. Reproducida de: Gippel (1989).





- **Bomba automática:** este instrumento permite tomar muestras automáticamente en intervalos durante un período de tiempo; habitualmente se instala en una estación de aforo, cuando se desean obtener registros de largo plazo. El equipo bombea muestras de la mezcla agua-sedimento desde el río a un conjunto de botellas (normalmente 24 para un único instrumento). La operación de bombeo puede programarse para que se produzca a intervalos de tiempo determinados, o en respuesta a cambios de la altura hidrométrica. Oportunamente las botellas se retiran y reemplazan por otras vacías, y las muestras se llevan a laboratorio para su análisis. Como las muestras se captan en un punto, puede ser necesario calibrar el resultado contrastando con muestras obtenidas a lo ancho de la sección transversal para que se pueda aplicar un factor de corrección. Este equipo requiere de mantenimiento periódico, el cual incluye el reemplazo de la batería.

### 5.3 Análisis de laboratorio

Las muestras de la mezcla agua-sedimento se filtran, y el sedimento se seca. La **concentración de sedimentos** se calcula normalmente como la relación entre el peso seco de las partículas y el peso o volumen total de la mezcla. Las unidades estándar en que se expresa la concentración son **mg l<sup>-1</sup>** y **ppm**, relacionadas entre sí mediante la siguiente expresión:

$$C \text{ (ppm)} = C \text{ (peso/volumen)} \times 10^6 / \rho \text{ (peso/volumen)}$$

Ecuación 1

donde  $\rho$  es la densidad de la mezcla agua-sedimento expresada en las mismas unidades que la concentración (peso/volumen). Si el valor de la densidad es  $1000 \text{ kg m}^{-3}$ , la concentración tiene el mismo valor en  $\text{mg l}^{-1}$  y ppm.

En grandes ríos, en los que la concentración cambia poco a lo largo del día, una única muestra instantánea puede transformarse en descarga diaria de sedimentos en suspensión usando la expresión:

$$Q_{ss} = 0,0864 Q_d C_t$$

Ecuación 2

donde  $Q_{ss}$  es caudal sólido en suspensión (toneladas día<sup>-1</sup>),  $Q_d$  es el caudal medio diario ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) y  $C_t$  es concentración de sedimentos en suspensión ( $\text{mg l}^{-1}$ ).

También suelen realizarse otros análisis que incluyen distribución de tamaños de granos, velocidad de caída y composición mineralógica.

## 6 Medición del transporte de la carga de fondo

El objetivo es medir el peso o volumen de sedimento que pasa a través de una sección transversal de la corriente, por unidad de tiempo y por unidad de ancho. El peso requerido es habitualmente el peso seco, pero inicialmente puede determinarse como peso seco, húmedo o peso sumergido. El volumen generalmente es el global (es decir, volumen de granos y poros), mientras que el peso se refiere efectivamente sólo al de las partículas.

Las mediciones directas del **transporte de carga de fondo** son tan dificultosas que no se ha convenido un procedimiento estándar. La medición

precisa no es posible debido al movimiento de la arena en las formas de fondo, a la naturaleza episódica del movimiento de las partículas individuales (y en realidad del transporte mismo de sedimentos) y a la dificultad de captar todas las fracciones de tamaño presentes (arena, grava, guijarros) con el 100% de eficiencia; la **eficiencia** se define como la relación entre el transporte de carga de fondo medido y el verdadero. Las técnicas disponibles en general han sido diseñadas para los extremos o grueso (grava) o fino (arena) de los rangos de tamaño de partículas, pero no para mezclas de las mismas. Consecuentemente existen dificultades particulares en el muestreo de cargas de fondo, en las cuales las proporciones de arena, grava y guijarros varían constantemente. Además, la fracción arena puede moverse como carga de fondo bajo determinadas condiciones del escurrimiento, y como carga en suspensión bajo otras.

Los sitios de medición deben elegirse de tal modo que el sedimento obtenido sea representativo tanto de la cantidad como del tamaño de los materiales que son transportados a lo largo del cauce. Por ejemplo, un sitio de toma de muestras ubicado aguas abajo de una hoya no sería adecuado, dado que las partículas pueden depositarse. El mayor transporte de carga de fondo (y en muchas corrientes, su totalidad) se produce durante la ocurrencia de los máximos caudales, y por lo tanto requiere ser medido durante esos períodos. Un esquema de muestreo adecuado (por ejemplo para construir curvas de descarga) puede insumir mucho tiempo y altos costos, y suele ser reemplazado por estimaciones más sencillas. Una de ellas consiste en estimar el transporte de carga de fondo como el 10% de la carga en suspensión en ríos de llanura con fondos de arena. Sin embargo ese valor podría ascender a 50% en ríos de montaña con lechos de material grueso.

## 6.1 Características de un buen captador

Un captador de carga de fondo ideal debería atrapar partículas grandes y pequeñas con la misma eficiencia, sin alterar el patrón natural del flujo ni el movimiento de las partículas. Se considera satisfactoria una eficiencia de 60-70%.

## 6.2 Tipos de captadores

Se utilizan **estructuras fijas** tanto como **equipos portátiles**.

### Estructuras fijas

Estos captadores están limitados en su uso a pequeñas corrientes, debido al tipo de estructura involucrada.

- **Trampa de carga de fondo.** Consiste en una trinchera excavada en el fondo del cauce. El material atrapado en ella es removido y obtenido luego su peso total a intervalos apropiados de tiempo, por ejemplo después de cada tormenta, o bien a intervalos regulares. Proporciona un valor global de la producción de transporte de fondo para intervalos de tiempo específicos, pero no mide tasas instantáneas de transporte. (Algunas versiones construidas en programas de estudio específicos de este dispositivo pueden brindar tasas de variación temporal, por ejemplo mediante la instalación de una membrana de presión sobre el fondo de la

trampa, mediante la cual se miden los cambios de peso del material capturado.) La eficiencia es probablemente del 100% para todos los tamaños de partículas presentes, dependiendo de las dimensiones con que se diseñe la trampa.

- **Tubo-vórtice.** Es un tubo o trinchera de sección circular dispuesto en diagonal sobre el fondo del cauce, que puede utilizarse para registrar en forma continua la tasa de transporte instantánea. El sedimento transportado como carga de fondo cae dentro del tubo y es trasladado a lo largo del mismo por la acción de un vórtice inducido por el flujo de agua sobre la parte superior del tubo; se descarga dentro de un área de trabajo adyacente prevista para la medición. La eficiencia de captura es de 100% para arenas gruesas y partículas mayores para todos los escurrimientos; también puede ser del orden de 100% para arenas medias y finas, en flujos menores.
- **Acústico.** Es un hidrófono utilizado para medir el transporte de carga de fondo a partir del sonido o vibración producidos por el movimiento de las partículas. Estos dispositivos pueden registrar el sonido que producen las partículas al moverse a lo largo del fondo del cauce (para estos casos el sistema puede ser portátil). Alternativamente pueden conectarse a un plato metálico ubicado sobre el fondo, y registrar las vibraciones causadas por los granos de sedimento que pasan por encima del plato. El método mide la incidencia e intensidad del transporte de fondo, pero las señales emitidas deben calibrarse mediante comparación con mediciones, si se pretende que proporcionen por sí mismas la tasa de transporte. El uso de los dispositivos acústicos se limita únicamente a fines de investigación.

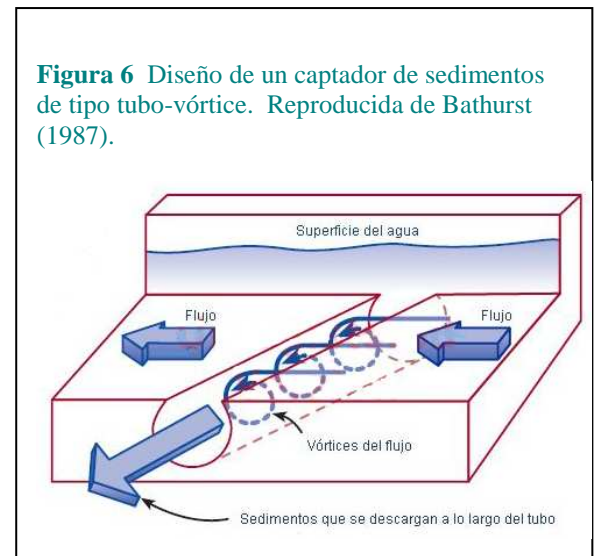


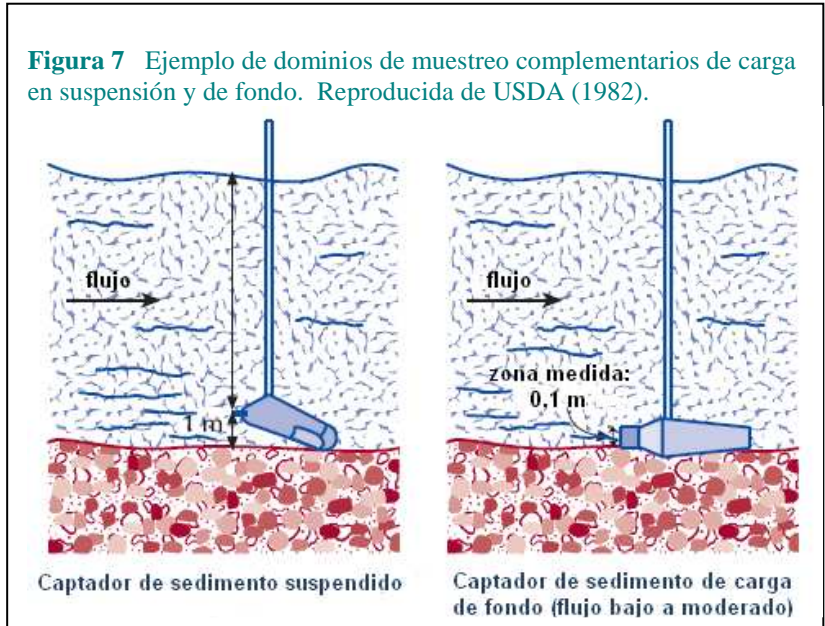
Figura 6 Diseño de un captador de sedimentos de tipo tubo-vórtice. Reproducida de Bathurst (1987).

### Equipos portátiles

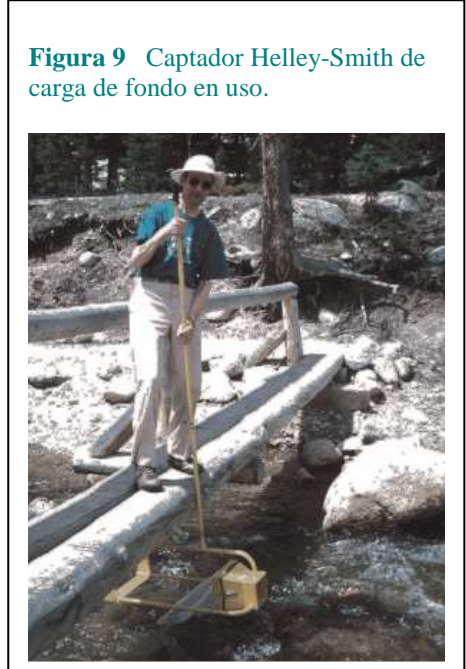
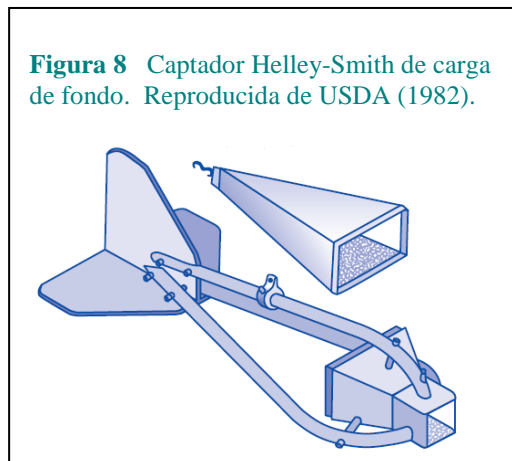
Son cajas o canastas que se bajan hasta tocar el fondo para coleccionar en su interior una muestra de sedimentos a lo largo de un período corto de tiempo. Generalmente poseen una boquilla de entrada y un recipiente permeable -similar a una bolsa confeccionada en malla- para retener el sedimento. Pueden ser operados desde puentes y cablecarriles o por vadeo, pero son difíciles de utilizar en corrientes altas. Proporcionan las tasas de transporte instantáneas y las muestras obtenidas se pueden analizar para obtener la distribución de tamaños de las partículas que las constituyen. Sus características y aplicaciones se detallan a continuación.

- El captador de sedimentos no debe perturbar las condiciones del flujo. Hay un peligro, dado que el dispositivo de muestreo incrementa la resistencia al flujo a su alrededor, de que la presión aumente y la velocidad de entrada de la mezcla agua-sedimento disminuya, ocasionando una acumulación del material transportado en el frente del equipo y provocando, por lo tanto, la toma de una muestra no representativa. Para evitar este efecto, la velocidad de entrada a través de la boquilla debe ser igual a la velocidad de la corriente. Esto se logra mediante una divergencia de las paredes del captador hacia su parte posterior, lo cual justifica su denominación como captador por diferencia de presiones.

- El dispositivo deberá estar nivelado con el lecho, de modo de evitar que se produzca socavación inferior o que la boquilla se entierre en el fondo.
- El tiempo de muestreo deberá ser suficientemente largo como para considerar las fluctuaciones espaciales y temporales de la carga de fondo. A lo ancho de la sección, se debe tomar un cierto número de muestras a intervalos determinados, para obtener el transporte de carga de fondo total que pasa a través de ella.
- La posición en que se coloca el equipo deber ser cuidadosamente tenida en cuenta para el caso de lechos de arena que presentan formas de fondo en movimiento.
- El tamaño de la boquilla establece el límite para el máximo diámetro de partícula que podrá ser captada. Los granos de tamaño menor que la abertura de la malla pueden no ser retenidos. El atascamiento de las aberturas de la malla ocasionada por partículas más pequeñas o materiales orgánicos puede reducir la eficiencia de atrape.
- En caso de combinar la medición de carga de fondo con la de carga en suspensión para obtener la carga total, deberá tenerse la precaución de no superponer los dominios de muestreo (conocido como problema de la captura doble). Las muestras necesarias se deberán obtener de dominios complementarios (véase *Figura 7*).



Un ejemplo de captador por diferencia de presión que está recibiendo creciente atención es el **captador Helley-Smith** (véase *Figura 8*). Posee mayor eficiencia que el tubo-vórtice para los tamaños más finos de partículas.



## Toma de muestras con un equipo portátil

Técnica para la toma de muestras con un captador Helley-Smith.

- 1 Las muestras se toman en un número de tres a diez puntos para cada sección transversal. La separación en dirección lateral puede variar y debe disminuir en zonas de transporte mayor. El tiempo de operación usualmente es el mismo para todos los puntos de toma de muestras.
- 2 De cada muestra se puede obtener el peso húmedo en campo o el peso seco en laboratorio.
- 3 El caudal de la carga de fondo por unidad de ancho de la corriente  $Qbl$  se calcula en cada punto de medición como:

$$Qbl_i = M_i / w t$$

donde  $M_i$  es el peso de muestra en el punto  $i$ ,  $w$  es el ancho de la boquilla y  $t$  es el tiempo de toma de muestra. Se asume que cada medición representa el ancho de la respectiva subsección (análogamente a los métodos de área-velocidad para el cálculo de caudal líquido). Por lo tanto, el caudal de carga de fondo para la subsección se obtiene multiplicando  $Qbl_i$  por el ancho de la subsección. El caudal total de carga de fondo es la suma de los valores parciales de las subsecciones o fajas, expresado como peso por unidad de tiempo.

Ecuación 3

## 7 Medición de la distribución de tamaños de sedimentos del lecho

La **distribución de tamaños de sedimentos del lecho** se requiere para el cálculo de la resistencia al flujo, transporte de sedimentos, desarrollo de formas de fondo, adsorción de contaminantes, entre otras variables de interés. Se utilizan diferentes técnicas de medición para los distintos tipos de sedimentos.

### 7.1 Tipos de muestras

Para **arenas, limos y arcillas**, se toman muestras a granel, por ejemplo mediante dispositivos tipo draga con cucharas. Esta técnica se puede aplicar tanto en aguas profundas como en depósitos expuestos al aire. La distribución de tamaños de la fracción arena se obtiene por tamizado, midiendo el peso de material retenido por cada tamiz representativo de un intervalo de clase de tamaños. Se requieren técnicas especiales para determinar la distribución de tamaños de sedimentos cohesivos, limos y arcillas.

En el caso de capas superficiales de **gravas, guijarros y cantos rodados**, la muestra a granel equivalente al caso anterior suele tornarse demasiado grande para ser manejable. Debido a ello la muestra del material constitutivo del lecho se logra sobre la base de una grilla (la técnica **Wolman**), a partir de la cual se mide el diámetro intermedio de cada partícula de la muestra, y la distribución de tamaños se obtiene como el número de partículas que caen dentro de cada intervalo de clase de

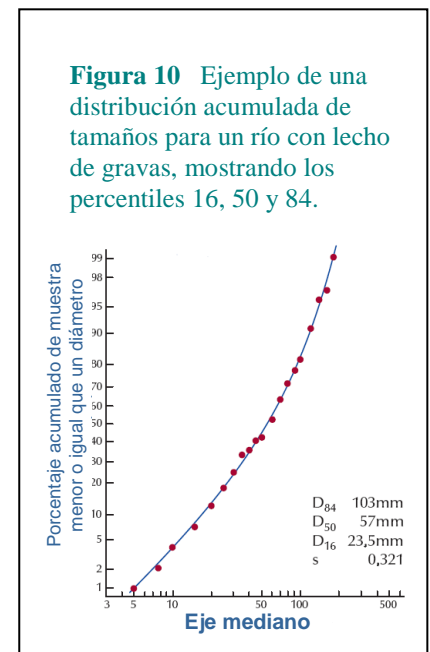
diámetros considerados. Cada muestra debe estar constituida por un mínimo de 100 clastos; se aplican diversas fórmulas para establecer el error estadístico de la muestra. Esta técnica puede utilizarse en aguas poco profundas y en depósitos de sedimentos expuestos al aire.

Las **gravas** en **capas subsuperficiales** pueden ser obtenidas con un **dispositivo de muestra congelada** (“freeze-core”). Con este equipo se bombea dióxido de carbono líquido a través de un conjunto de cañerías dentro del paquete de gravas. El gas expansible enfría la cañería y congela el agua que ocupa los poros de la capa de gravas, generando una masa sólida de sedimento que puede ser removida del sitio de toma. La muestra tiende a ser pequeña, no mantiene fácilmente partículas grandes (como guijarros) y puede estar sesgada hacia los mayores tamaños. La técnica es útil en aguas poco profundas y en depósitos de sedimentos expuestos al aire.

Las dificultades del muestreo de los lechos de los cauces compuestos por un amplio rango de tamaños de partículas (arenas, gravas, cantos rodados), que pueden variar espacialmente y con la profundidad de acuerdo al ambiente deposicional, y de la operatoria debajo del agua, justifican que se utilicen diferentes técnicas en distintos puntos de toma de muestra, e incluso en el mismo sitio. En consecuencia, la comparación cuantitativa de diversos conjuntos de datos de distribuciones de tamaños debe realizarse con sumo cuidado.

## 7.2 Análisis de laboratorio

Los datos de distribución de tamaños deben analizarse a partir de propiedades estadísticas como la media, mediana, valor modal y asimetría. Se pueden representar gráficamente bajo la forma de diagramas acumulativos porcentuales, que permitan obtener tamaños individuales asociados a un determinado porcentaje acumulado. Como ejemplo, las fórmulas para estimar resistencia al escurrimiento para fondos de grava a menudo usan  $D_{84}$ , que es el tamaño del diámetro intermedio de gravas para el cual el 84% del material presente en la muestra es más fino (véase *Figura 10*).



## 8 El principio de la curva de descarga de sedimentos

La **producción de sedimentos** es la cantidad de sedimentos que llega a un punto del río, procedente de la cuenca aguas arriba. Se mide en  $t \text{ año}^{-1}$  o, como producción de sedimentos específica, en  $t \text{ km}^{-2} \text{ año}^{-1}$ . Ella puede determinarse por:

- **medición directa** del caudal sedimentario durante un período de años;
- **estudio de la sedimentación de un reservorio** llevado a cabo para estimar la cantidad de sedimento que se ha acumulado desde el primer llenado del embalse (o bien desde la última vez en que se lo cuantificó). La *Tabla 2* muestra ejemplos del Reino Unido.

Río	Reservorio	Área de cuenca km <sup>2</sup>	Producción de sedimentos t km <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup>
Rede	Catcleugh	40,0	43,1
Bradgate	Cropston	17,8	45,6
Loxley	Strines	7,4	49,7
North Esk	North Esk	7,0	26,0
North Tyne	Hopes	5,0	25,0
Churnet	Deep Hayes	9,8	6,7
Wyre	Abbeystead	47,3	34,8

**Tabla 2** Estimaciones de producción de sedimento a largo plazo obtenidas de estudios de sedimentación en reservorios en el Reino Unido. Reproducido de Walling & Webb (1981), con datos de fuentes diversas.

Sin embargo, habitualmente no es posible medir la descarga de sedimentos sobre una base continua durante largos períodos de tiempo. Las autoridades responsables del control fluvial normalmente toman muestras con intervalos semanales, o incluso menos frecuentemente, con lo cual es probable que se pierda información de períodos importantes con altos valores de transporte de sedimentos, durante la ocurrencia de los eventos de crecida. El estudio de la sedimentación en reservorios puede desarrollarse sólo en aquellos sitios en que éstos ya han sido construidos. Es por ello que en muchas ocasiones los accesos enunciados no pueden aplicarse.

Una alternativa es derivar y aplicar la **curva de descarga de sedimentos**. Con ella se relaciona generalmente la concentración de sedimentos  $C$  con el caudal líquido  $Q$ , a partir de mediciones disponibles. La relación obtenida se puede expresar gráficamente en diagramas con ambos ejes logarítmicos, y se cuantifica habitualmente como una relación potencial de la forma:

$$C = a Q^b$$

Ecuación 4

donde  $a$  y  $b$  son el coeficiente y el exponente, respectivamente, derivados empíricamente. El valor típico de  $b$  cae en el rango 1,5-3. Pueden obtenerse relaciones de este tipo para concentraciones de la carga suspendida, de la carga de fondo o de la carga total, pero las más comunes se deducen para la carga en suspensión.

Nótese que la curva de descarga se obtiene para valores de concentración, no de descarga de sedimentos. Como esta última surge de multiplicar concentración por el respectivo valor de caudal líquido, relacionar descarga de sedimentos con descarga líquida introduce un grado de correlación espuria, produciendo un ajuste aparente mejor que el que se logra con el conjunto original de datos.

$$\text{Concentración de una muestra de sedimentos} = \frac{\text{Peso o volumen de sedimentos}}{\text{Peso o volumen de la mezcla agua - sedimentos}}$$

La concentración comúnmente se expresa como mg l<sup>-1</sup> o como partes por millón (ppm).

$$\text{Descarga de sedimentos} = \text{Concentración} \times \text{Caudal líquido}$$

## 9 Cálculo de la producción de sedimentos

La aplicación de la relación de descarga a un registro continuo de caudal líquido para un período dado produce un registro continuo de valores de concentración. La combinación de este último con el registro disponible de caudales líquidos, proporciona un conjunto de valores de descarga de sedimentos variable en el tiempo. Su integración para el período de tiempo brinda la producción de sedimentos:

$$\text{Producción de sedimentos} = \int_0^T \frac{Q_{ss} dt}{T \times \text{Área de cuenca}}$$

Ecuación 5

donde  $Q_{ss}$  es la descarga de sedimentos variable en el tiempo,  $T$  es el período y  $t$  es el tiempo.

Una técnica alternativa resulta de combinar la relación obtenida para la descarga de sedimentos con una **curva de duración de caudales líquidos**, como se ilustra en el ejemplo del Río Chaudière, Canadá (véanse *Tabla 3* y *Figuras 11* y *12*). La curva de duración de caudales ha sido expresada en intervalos discretos en la segunda y cuarta columnas de la tabla. Nótese que los intervalos porcentuales de tiempo seleccionados son más cortos a medida que el caudal se incrementa. La curva de descarga de sedimentos se utiliza para determinar la concentración en la quinta columna. La carga de sedimentos total anual se obtiene mediante la suma de todos los intervalos de la curva de duración de caudales.

1	2	3	4	5	6	7
Intervalos de tiempo	Punto medio del intervalo	Intervalo	Caudal $Q$	Concentración $C$	$Q \times p$	Carga de sedimentos $Q_s \times p$
(%)	(%)	(%)	( $m^3 s^{-1}$ )	( $mg l^{-1}$ ) <sup>A</sup>	( $m^3 s^{-1}$ )	( $t \text{ año}^{-1}$ ) <sup>B</sup>
0,00-0,02	0,01	0,02	1 643	605,7	0,329	6 276
0,02-0,1	0,06	0,08	1 473	525,5	1,178	19 528
0,1-0,5	0,30	0,40	1 218	410,5	4,871	63 066
0,5-1,5	1,00	1,00	935	291,0	9,346	85 771
1,5-5,0	3,25	3,50	595	161,7	20,816	106 152
5-15	10,0	10,0	301	66,8	30,133	63 493
15-25	20,0	10,0	155	28,2	15,506	13 773
25-35	30,0	10,0	99	15,6	9,867	4 870
35-45	40,0	10,0	69	9,8	6,896	2 137
45-55	50,0	10,0	52	6,8	5,208	1 120
55-65	60,0	10,0	39	4,7	3,894	574
65-75	70,0	10,0	29	3,2	2,917	295
75-85	80,0	10,0	22	2,2	2,161	148
85-95	90,0	10,0	15	1,4	1,549	69
95-98,5	96,75	3,5	11	0,9	0,394	12
						<b>367 283</b>

**Tabla 3** Producción de sedimentos a largo plazo del Río Chaudière a partir del método de duración de caudales y de la curva de descarga de sedimentos. Reproducida de Julien (1998).

NOTAS: Las columnas 2 y 4 definen la curva de duración de caudales. Las columnas 4 y 5 definen la curva de descarga de sedimentos. El producto de las columnas 3 y 4 figura en la columna 6.

<sup>A</sup> La concentración  $C$  en  $mg l^{-1}$  se calcula a partir del caudal  $Q$  en  $m^3 s^{-1}$ , como:

$$C = 0,04 Q^{1,3}$$

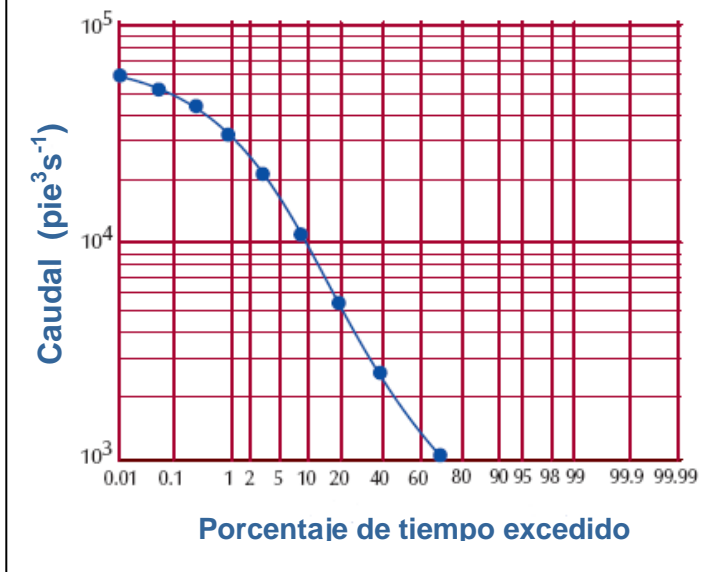
<sup>B</sup> La producción anual de sedimentos en  $t \text{ año}^{-1}$  se calcula como:

$$Q_s \times p = 31,54 \times C \times Q \times p$$

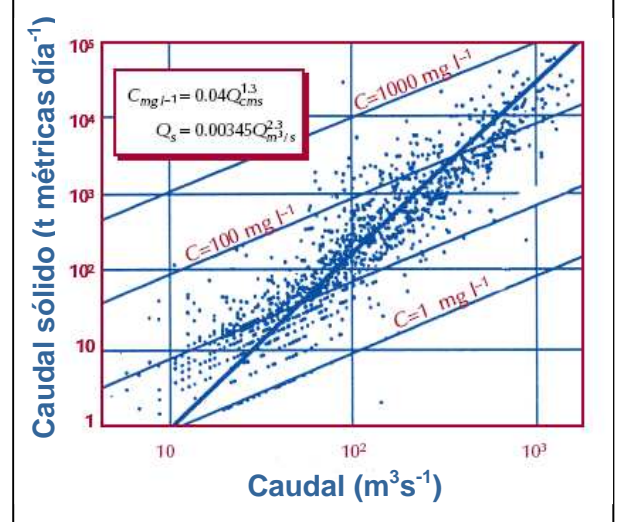
con  $C$  en  $mg l^{-1}$  y  $Q$  en  $m^3 s^{-1}$



**Figura 11** Curva de duración de caudales del Río Chaudière. Reproducida de Julien (1998).



**Figura 12** Curva de descarga de sedimentos del Río Chaudière. Reproducida de Julien (1998).



## 10 Fuentes de error

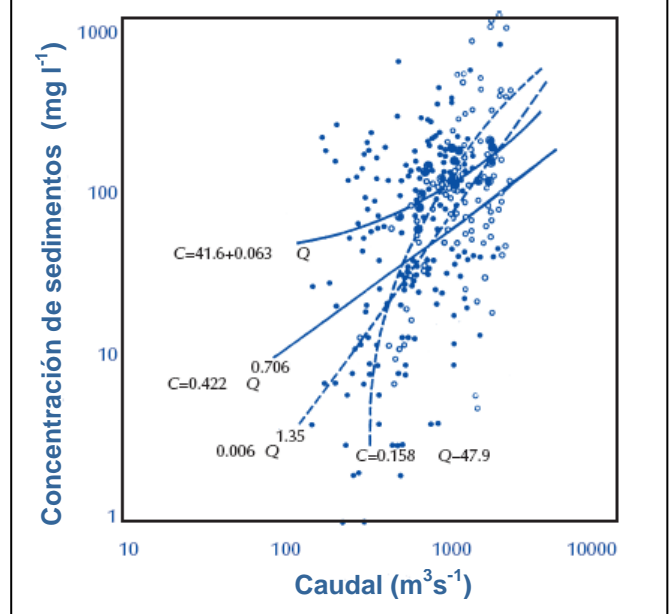
Los gráficos de los valores de concentración de sedimentos relacionados con los de caudal líquido habitualmente muestran una dispersión considerable (ver *Figura 13* como ejemplo). Las relaciones de descarga son, por tanto, aproximadas. Las razones para tal dispersión incluyen:

### 10.1 Origen del sedimento

La carga de sedimento en suspensión incluye la **carga de lavado** y una parte de la **carga de material de fondo**, pero sólo esta última es probable que varíe estrechamente con el caudal líquido del río.

La carga de lavado puede variar ampliamente para un mismo valor de caudal, de acuerdo a los mecanismos de suministro de sedimentos y las fuentes de procedencia del material (tales como colapso de márgenes, escurrimiento por laderas de montañas, o aportes por deslizamientos de taludes). Algunas partes de la cuenca pueden ser fuentes de provisión más prolíficas que otras, por lo que el ingreso de sedimentos al cauce puede variar en función de la distribución superficial de las precipitaciones y de la escorrentía, aún cuando éstas últimas, en definitiva, puedan generar el mismo caudal líquido.

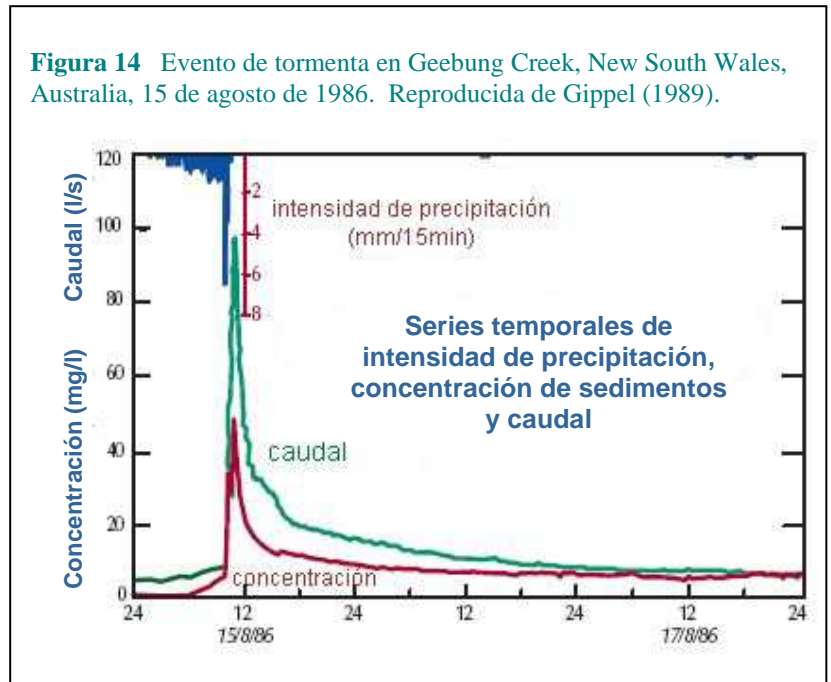
**Figura 13** Curvas de descarga de sedimentos para el río Alice en Konkonda, Papua Nueva Guinea. Como ocurren diferencias estacionales en las relaciones concentración-caudal, la dispersión de los puntos es tal que virtualmente se podría ajustar cualquier ecuación de regresión. Reproducida de Pickup (1988).



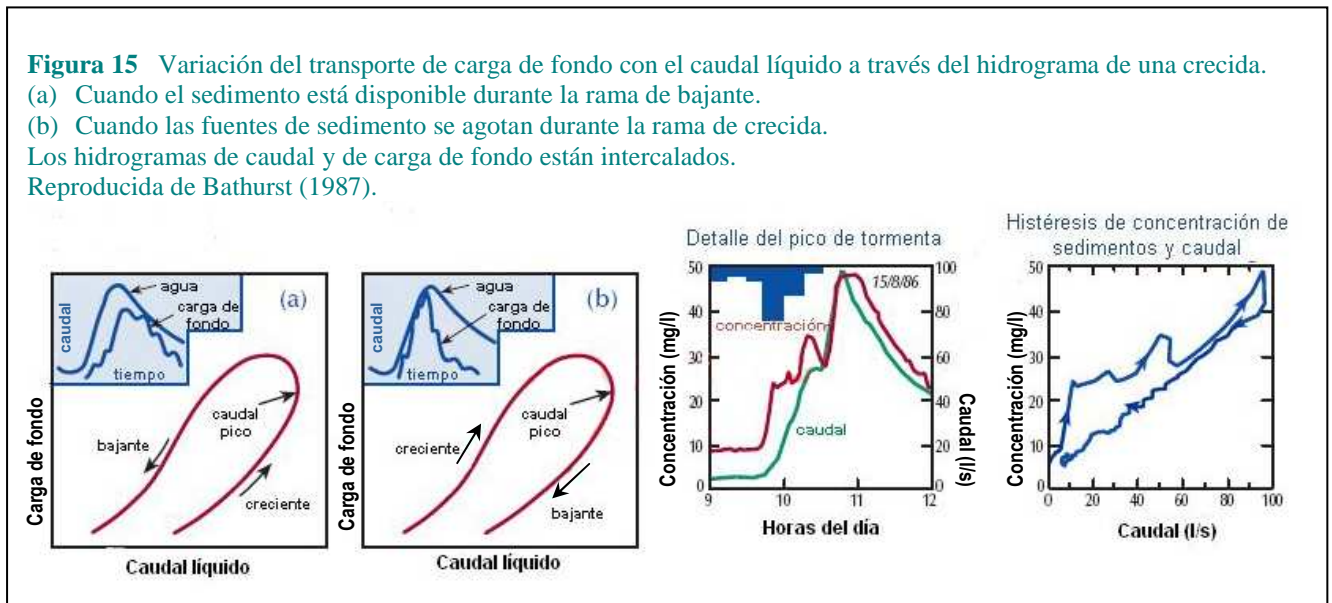
### 10.2 Variación durante un evento de crecida

Los caudales líquido y de sedimentos no siempre alcanzan sus valores pico simultáneamente, produciendo un efecto de histéresis (ver *Figura 14*). Los picos de la descarga de sedimentos posteriores al de caudal líquido, sugieren la puesta en movimiento de material del lecho que sigue a la ruptura de una **capa acorazada** ocasionada por el caudal máximo, o el colapso de márgenes saturadas cuando los niveles de agua bajan (*Figura 15 a*). La aparición de los picos de la descarga de sedimentos antes de la del caudal líquido indica que los abastecimientos de sedimento acumulado previos a la tormenta son removidos en la rama ascendente dejando poco material para transportar en la rama de bajante (*Figura 15 b*).

**Figura 14** Evento de tormenta en Geebung Creek, New South Wales, Australia, 15 de agosto de 1986. Reproducida de Gippel (1989).



**Figura 15** Variación del transporte de carga de fondo con el caudal líquido a través del hidrograma de una crecida. (a) Cuando el sedimento está disponible durante la rama de bajante. (b) Cuando las fuentes de sedimento se agotan durante la rama de crecida. Los hidrogramas de caudal y de carga de fondo están intercalados. Reproducida de Bathurst (1987).



### 10.3 Eventos de escurrimiento con picos múltiples

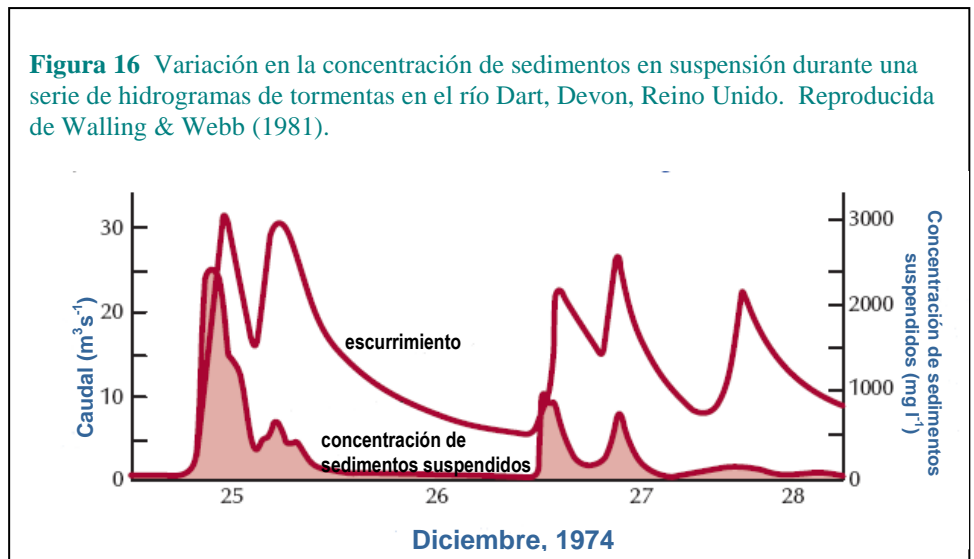
Dos eventos de crecida sucesivos de similar magnitud pueden transportar diferentes cargas de sedimento, debido a los efectos de suministro y agotamiento. El primer pico puede agotar la fuente de sedimentos, por lo que habrá menor cantidad disponible para ser transportada por el segundo pico (ver como ejemplo la *Figura 16*).

La erosión producida en laderas montañosas durante el primer evento puede generar sedimentos que no alcanzan el cauce hasta el segundo evento.

### 10.4 Variaciones estacionales

En ríos con régimen de deshielo, las crecidas tempranas propias de la primavera remueven las fuentes de sedimento acumuladas durante el invierno. Las crecidas tardías de la primavera y del verano trasladarán luego cargas de sedimento inferiores para un caudal dado, debido a que las fuentes de provisión de sedimentos ya están agotadas. En una cuenca con áreas significativas destinadas al uso agrícola,

la presencia de suelo desnudo (arado) en ciertos períodos del año podría resultar en cargas de sedimentos relativamente altas para un caudal determinado, mientras que en otras épocas del mismo año se registran cargas inferiores. Un ejemplo se muestra en la *Figura 17*.



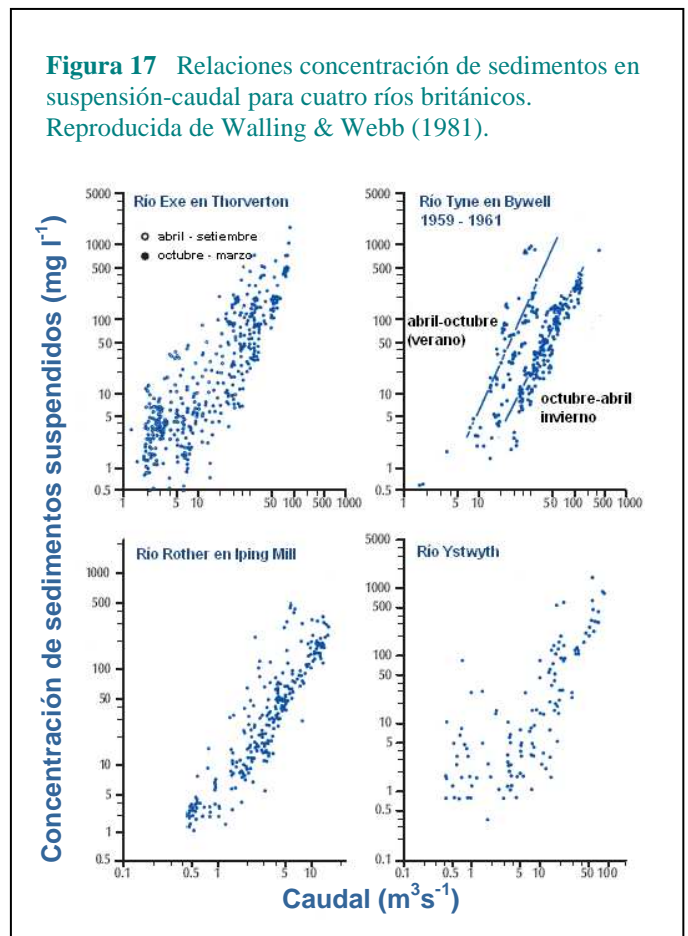
**Figura 16** Variación en la concentración de sedimentos en suspensión durante una serie de hidrogramas de tormentas en el río Dart, Devon, Reino Unido. Reproducida de Walling & Webb (1981).

## 11 Uso de las curvas de descarga de sedimentos

Las curvas de descarga de sedimentos deben ser utilizadas con precaución debido a la dispersión asociada con ellas. La suposición implícita es que puede establecerse una relación estable entre concentraciones y caudales líquidos la que, a pesar de la dispersión que posee, permitirá determinar la producción media de sedimentos sobre la base de los registros de caudales.

Las curvas de descarga de sedimentos no proporcionan estimaciones exactas de la concentración instantánea. Sin embargo, cuando se las aplica para estimar la producción de sedimentos media anual (o incluso media mensual), los errores en la relación tenderán a compensarse, y el resultado obtenido será razonablemente satisfactorio si se utiliza un registro de datos suficientemente extenso. Además, brindarán una mayor precisión si son aplicadas a cuencas pequeñas y relativamente homogéneas.

Para un único sitio pueden llegar a ser necesarias múltiples relaciones para distintas estaciones o condiciones (por ejemplo, estados de crecida y de estiaje, verano e invierno, caudales bajos o elevados).



**Figura 17** Relaciones concentración de sedimentos en suspensión-caudal para cuatro ríos británicos. Reproducida de Walling & Webb (1981).

## Resumen

Este documento proporciona el conocimiento básico para llevar a cabo mediciones directas de carga de fondo, carga de sedimentos en suspensión, y distribución de tamaños de sedimentos del lecho; para construir y aplicar una curva de descarga de sedimentos y juzgar los resultados de mediciones y la aplicación de una curva de descarga en el contexto de sus probables errores.

## Referencias

- Gordon, N.D., McMahon, T.A. & Finlayson, B.L. (1992) *Stream Hydrology: An Introduction for Ecologists*. 526 pp. Chichester, UK: Wiley.
- Julien, P.Y. (1998) *Erosion and Sedimentation*. 280 pp. (paperback). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Morris, G.L. & Fan, J. (1998) *Reservoir Sedimentation Handbook*. Approx. 1000 pp. New York: McGraw-Hill.

## Referencias adicionales citadas

- Bathurst, J.C. (1987) 'Measuring and modelling bedload transport in channels with coarse bed materials', in *River Channels: Environment and Processes*. K. Richards (ed.) pp 272-294. Oxford, UK: Blackwell.
- Gippel, C.J. (1989) *The use of turbidity instruments to measure stream water suspended sediment concentration*. Monograph Series No. 4, 204 pp. Department of Geography and Oceanography, University College, Australian Defence Force Academy, Canberra.
- Pickup, G. (1988) 'Hydrology and sediment models', in *Modelling Geomorphological Systems*. M.G. Anderson (ed.), pp 153-215. Chichester, UK: Willey.
- USDA (1982) *Sediment transport, water quality and changing bed conditions, Tucannon River, Washington*. US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Spokane, Wash., USA.
- Walling, D.E. & Webb, B.W. (1981) 'Water quality', in *British Rivers*. J. Lewin (ed.) pp 126-169. London: Allen & Unwin.