

ESCORRENTÍA Y TRANSPORTE SÓLIDO EN LA CUENCA TORRENCIAL DE LA RIERA DE LAS ARENAS

Metodología de investigación y primeros resultados

¹J.P. Martín; ¹D. Niñerola; ¹A. Bateman; ²L. Gómez

¹E.T.S.I.C.C.P. Universitat Politècnica de Catalunya.

²Facultad de Geografía. Universidad de Barcelona.

RESUMEN: Algunos ríos de la cuenca mediterránea española se caracterizan por ser de escasa longitud, gran pendiente y carácter torrencial, en sentido meteorológico, hidrológico e hidráulico, causando avenidas catastróficas. El artículo presenta el estudio realizado en la riera de Las Arenas durante tres años y medio con el objetivo de cuantificar el caudal y el transporte sólido de fondo en avenidas. Se trata especialmente de la instrumentación de la cuenca (pluviómetros, pluviógrafos, estación de aforos y trampa de sedimentos), la calibración de los instrumentos e instalaciones (incluyendo un modelo reducido), los primeros datos obtenidos en las 6 avenidas registradas y un análisis hidrológico mediante el modelo HEC 1.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Este artículo presenta una investigación, en curso desde 1990, cuya base es el trabajo de campo en una cuenca hidrológica torrencial, tomada al efecto como cuenca experimental. Los objetivos de estudio y las metodologías de medida se han ido desarrollando al compás de la observación y del análisis hidrológico. El artículo destaca las cuestiones metodológicas, pero apunta también los primeros datos y análisis. Se pretende continuar la investigación a largo plazo para recolectar un buen número de episodios y así hacer en el futuro un mejor análisis de los sucesos y un análisis hidrológico de su frecuencia.

La dificultad de la investigación proviene del carácter torrencial, buscado al elegir la cuenca. Esta torrencialidad se caracteriza por los siguientes aspectos:

1) la causa **meteorológica**: la intensidad de los aguaceros es muy alta en el litoral del mar mediterráneo, en Levante y Cataluña, como resultado de tormentas convectivas principalmente. Las cantidades diarias máximas de precipitación esperadas con un período de retorno de 10 años son de 105 mm en Barcelona (e intensidad máxima durante una hora mayor de 1 mm/min), hasta 260 mm en otras partes del Levante, frente a 45 mm en el centro de la Península (Toledo) (Martín Vide, 1992).

2) la respuesta **hidrológica**: las cuencas pequeñas, al pie de las cordillera Prelitoral y Litoral de Cataluña, concentran rápidamente la escorrentía dando lugar a avenidas súbitas con caudales muy elevados en tiempos muy cortos, bajo tormentas intensas en verano y otoño especialmente. Estas cuencas sufren también una gran presión urbanizadora, lo que agudiza la respuesta hidrológica.

Artículo recibido el 8 de enero de 1996 y aceptado para su publicación el 25 de marzo de 1996. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado

3) la respuesta **hidráulica**: los cauces de estos ríos son de gran pendiente (por ej. del 1 al 3%), de modo que las aguas circulan en régimen rápido y con una gran capacidad de transporte sólido debido a la alta velocidad. Los volúmenes de sedimento movilizados por una avenida son muy altos. Por causa hidráulica, o bien hidrológica, el flujo en avenida se presenta a veces en oleadas o frentes de onda.

En estrecha relación con la torrencialidad hay que destacar también:

4) algunas características **geomorfológicas** de estas cuencas: a) por razones geológicas y climáticas, algunos cursos son efímeros en sentido hidrológico, pues sólo presentan escorrentía en sucesos de precipitación muy intensa, manteniéndose secos todo el resto del tiempo. Este hecho, asociado normalmente a zonas áridas, ocurre también en regiones semihúmedas como Cataluña. El carácter esporádico del flujo condiciona fuertemente la metodología de las medidas hidrológicas e hidráulicas, b) los cauces están constituidos por materiales granulares, arenas y gravas, en cantidad ilimitada, disponibles para el transporte. Esto explica también los grandes volúmenes de acarreo movidos en las avenidas y la inestabilidad del propio cauce.

Desde el punto de vista de la ingeniería civil, las avenidas en estas cuencas torrenciales son temibles por motivos específicos como son: la falta de tiempo para reaccionar, las acciones mecánicas de la corriente torrencial (agua y sólidos) y el desarrollo de erosiones transitorias generales y locales que amenazan las obras

de encauzamiento y las infraestructuras. La concentración de población y actividades económicas en el litoral es una tendencia constante que agrava los efectos de estas avenidas.

Los objetivos del proyecto de investigación son dos: 1) la cuantificación de la escorrentía o caudal en el cauce, en sucesos de precipitación intensa (objetivo hidrológico) y 2) la cuantificación del material sólido transportado por la corriente, especialmente como transporte de fondo, en relación al caudal de agua en avenidas (objetivo hidráulico). Estos objetivos se formulan en vista del desconocimiento sobre hidrología e hidráulica torrencial de cuencas mediterráneas en nuestro país, quizá por las dificultades de observación y medida a causa de su funcionamiento "explosivo". Se persigue la aplicación de este conocimiento a la ingeniería civil en cuestiones como la modelación hidrológica lluvia-escorrentía, el caudal de diseño y el caudal sólido para el análisis de obras en lecho erosionable vivo (pilas de puente, muros de encauzamiento) o los volúmenes permisibles de extracción de áridos.

DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA

La riera de Las Arenas es un afluente del río Llobregat en la vertiente sur de la cadena prelitoral catalana, muy cerca de Barcelona (Figura 1). Los límites superiores de la cuenca forman una orla montañosa que alcanza la cota 1104 m (Figura 2). Esta parte alta de la cuenca, integrada en el Parque Natural de Sant Llorenç del

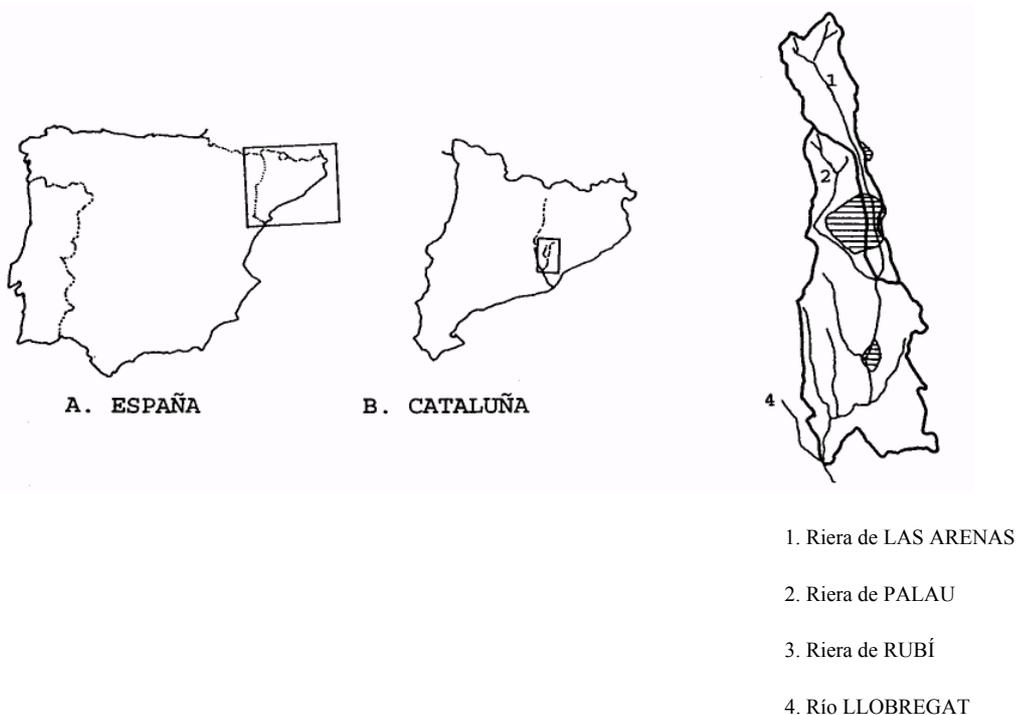


Figura 1 Situación de la riera de Las Arenas

Munt está cubierta de bosque mediterráneo, y afloran en superficie conglomerados de gravas y bolos con cemento arcilloso y calcáreo muy disgregados. La urbanización de tipo residencial unifamiliar ha ido ocupando las faldas del parque hasta la cota 600 m aproximadamente. En la cota 400 m comienza una cuenca netamente urbana: en

este lugar se estableció una sección de observación en el cauce (Figura 2, punto 6) donde se clavaron estacas de control; el área de la cuenca contribuyente en este punto es de 23.9 km² y la longitud de curso 12.6 km, con pendientes del 3.6 al 3.2% (Figura 3). El resto de la cuenca es una estrecha faja de la ciudad de Terrassa, que es bordeada por el río, el cual va encauzado mediante dos muros que definen una anchura de 50 m. La longitud del río en este tramo es 5.7 km, la pendiente del 3.2 al 2.0% y el área total de la cuenca en el punto de desembocadura es 30 km², donde la riera confluye con la riera de Palau y forma la riera de Rubí (Figura 1). En este lugar se construyó la estación de aforos y trampa de sedimentos (Figura 2, punto 11).

Es notable la pendiente tan elevada del cauce, así como su funcionamiento esporádico. El lecho es muy permeable: ensayos in situ dieron valores de permeabilidad de 0.005 a 0.01 cm/s. La frecuencia de circulación de agua en el cauce es muy baja (quizá cinco veces al año en promedio). Las aguas perdidas recargan el acuífero del Valles y alimentan la riera de Palau, de menor cuenca vertiente, con cauce a cota más baja y con un régimen hidrológico casi permanente. Los ensayos granulométricos realizados en el cauce a la salida de la cuenca, sobre una muestra subsuperficial de unos 320 kg de peso, dieron una distribución granulométrica bimodal (Figura 4) con presencia destacada de gravas finas y de gravas gruesas. Añadiendo a la distribución los bolos de la muestra superiores al tamiz máximo,

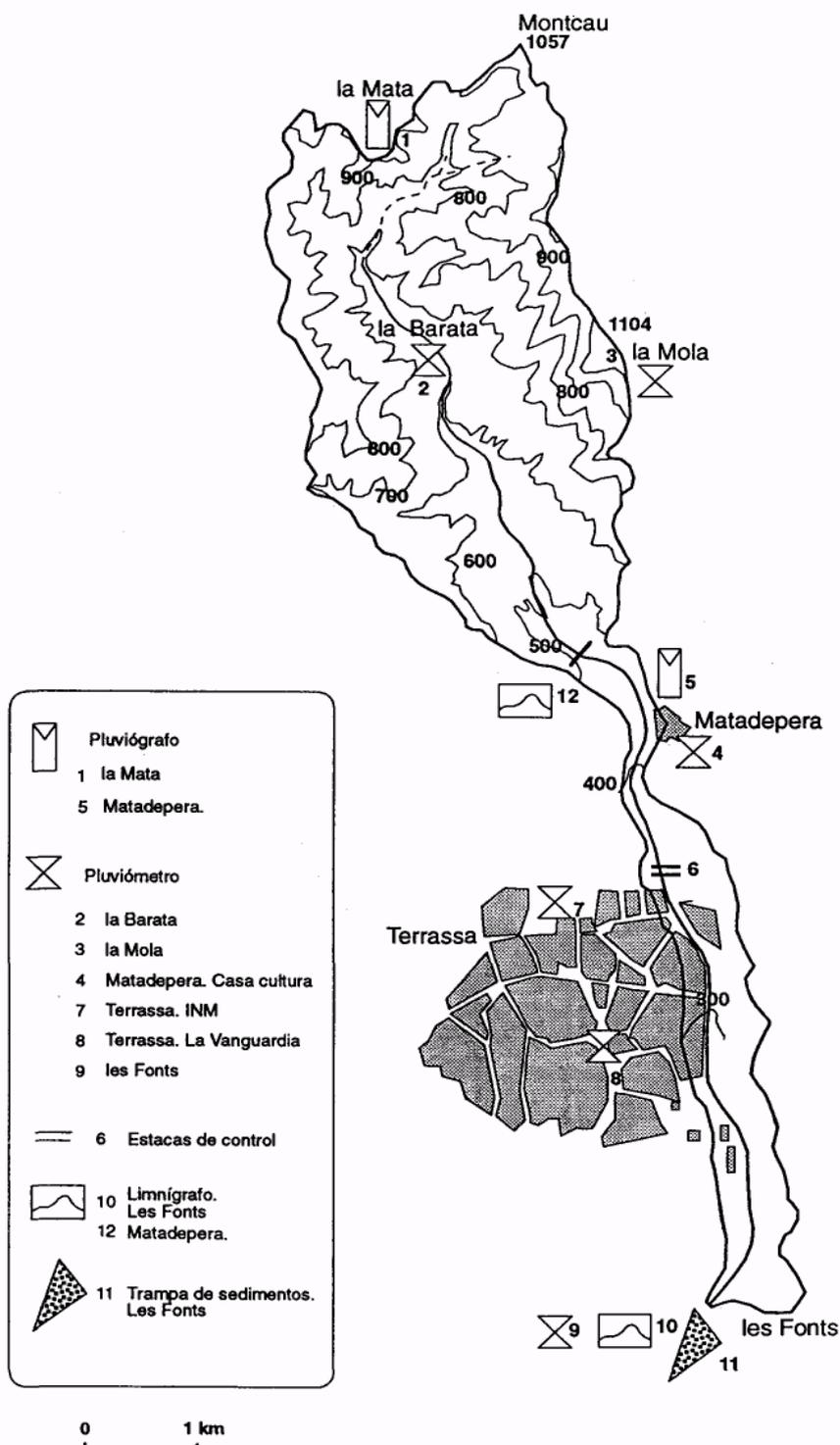


Figura 2 Plano de la cuenca con los instrumentos de medida

cubicados in situ, el tamaño medio D_m es 30 mm, así como $D_{50}=8$ mm y la desviación típica granulométrica $\sigma=\sqrt{(D_{84}/D_{16})}=6.7$. Se trata de un lecho de gravas de granulometría bastante extendida. Comparando con una muestra superficial, el lecho no se encuentra acorazado tras una avenida.

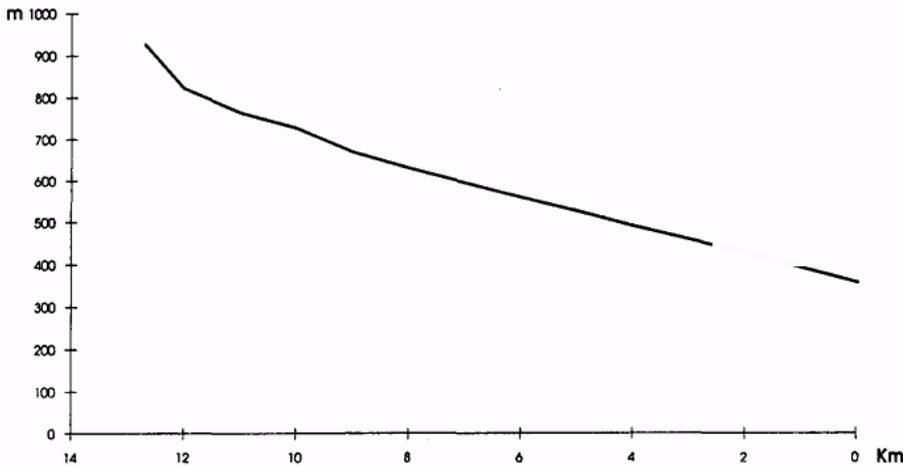


Figura 3 Perfil longitudinal de la riera de Las Arenas (aguas arriba de Terrassa hasta el punto 6, Figura 2).

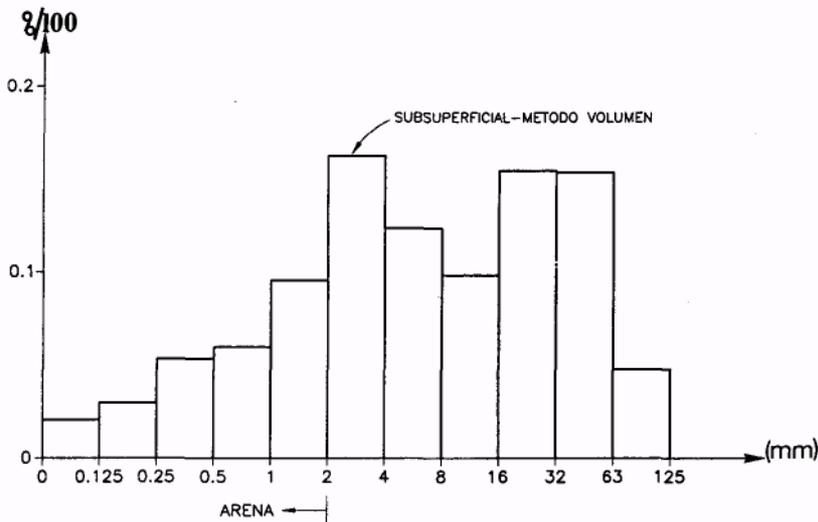
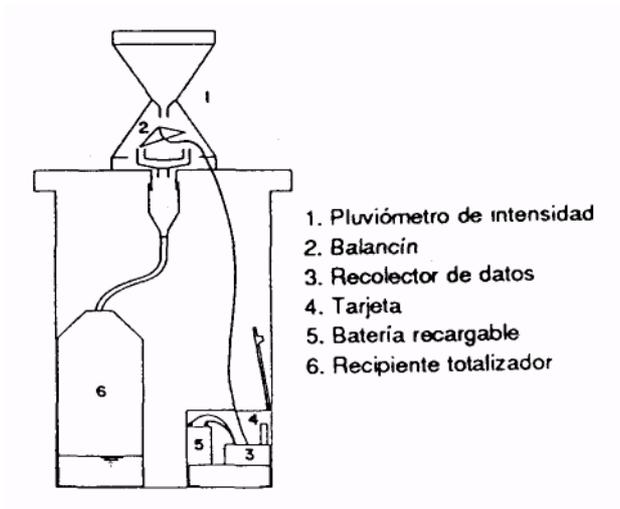


Figura 4 Distribución granulométrica del material del cauce menor de 125 mm

Las avenidas más importantes ocurridas en los últimos años son las de 1962 y 1971. En la primera murieron 973 personas y fueron muy elevados los daños materiales. La precipitación total el 25 de Septiembre de 1962 sobre la cuenca fue de 180 a 220 mm (Rosselló, 1992). En un observatorio cercano (Sabadell) se registró una intensidad más de media hora. El caudal máximo que se ha estimado para esta avenida en el punto 6 es 320 m³/s, mientras que el caudal sólido durante la punta de la avenida pudo alcanzar hasta un 38% en volumen según cálculos teóricos (López Bustos, 1964). La segunda avenida, en los días 19 a 21 de Septiembre de 1971, no fue tan grave. Las cantidades totales de precipitación en la cuenca fueron de 100 a 130 mm/día, con valores máximos de intensidad de 70 mm/h.

EQUIPAMIENTO E INSTRUMENTACIÓN DE MEDIDA

La cuenca de la riera de Las Arenas ha sido equipada a tenor de los objetivos hidrológico e hidráulico señalados. En primer lugar se han instalado 2 pluviómetros automáticos y 2 pluviógrafos para la medida de la precipitación (Figura 2). Los pluviómetros son de tipo balancín (cazoletas basculantes) con una superficie colectora de 0.05 m² y una resolución de 0.02 mm (Figura 5). Cada vuelco del balancín cierra un contacto con el cual el instante queda grabado en un recolector de datos. Este es alimentado con una batería recargable con duración mínima de 8 meses, ya que mientras no llueve el consumo de energía es prácticamente nulo. Como elemento de comprobación se instala un recipiente totalizador del agua que ha pasado por el pluviómetro. La lectura de datos se hace con un ordenador personal portable. Los pluviógrafos tienen una superficie colectora de 0.02 m² dando un registro gráfico continuo a lo largo del tiempo, definido por la subida de una boya, hasta completar un pequeño depósito de 10 mm, que se vacía por un sifón.



1. Pluviómetro de intensidad
2. Balancín
3. Recolector de datos
4. Tarjeta
5. Batería recargable
6. Recipiente totalizador

Figura 5 Detalle de los pluviómetros automáticos empleados.

En el punto de desembocadura de la riera (Figura 2) se adaptó una obra ya existente como estación de aforos. La obra es una barrera transversal o azud enterrado, construida en los años setenta para disipar la energía de la corriente y facilitar la unión con la riera de Palau. La obra se aprovecha como sección de control hidráulica, midiéndose el nivel de agua en un pozo comunicado por filtración con el cauce. En el pozo flota la boya de un limnógrafo (Figura 6). Esta clase de toma de nivel viene aconsejada por el funcionamiento esporádico del río. Como complemento a la estación, se construyó una trampa de sedimentos totalizadora del material sólido transportado (Figura 6). En su primera versión, consistía en un muro de cierre en un rincón de la obra existente, que definía un volumen de 88 m^3 para acumulación de sedimentos. El agua con los sedimentos entra por una anchura de 6.6 m , mientras el agua sale por un desagüe superficial o rebosando por encima del muro. En la segunda versión, se ha recrecido hasta 103 m^3 y se ha reducido la boca de entrada a 3.5 m de anchura. Los cálculos estimativos y los primeros sucesos reales indicaron que una trampa como ésta sólo es suficiente para avenidas pequeñas.

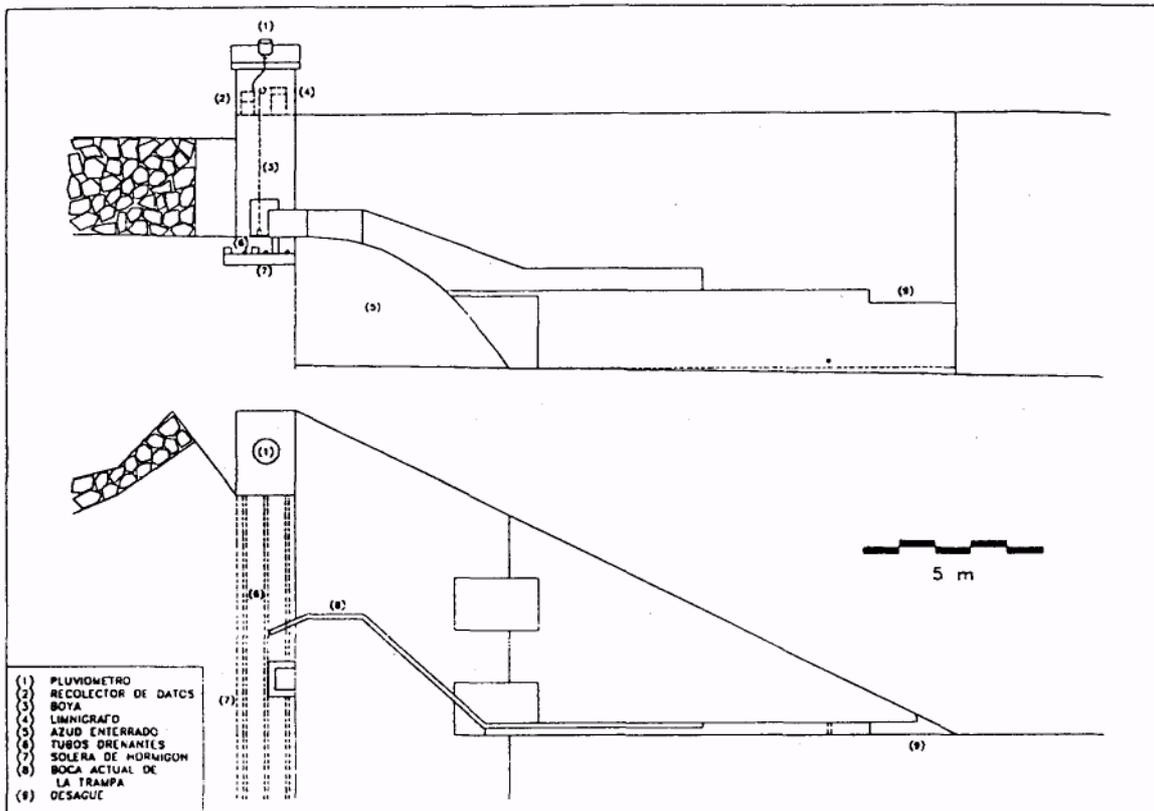


Figura 6 Estación de aforos y trampa de sedimentos actual (2ª versión) en la desembocadura de la riera de Las Arenas.

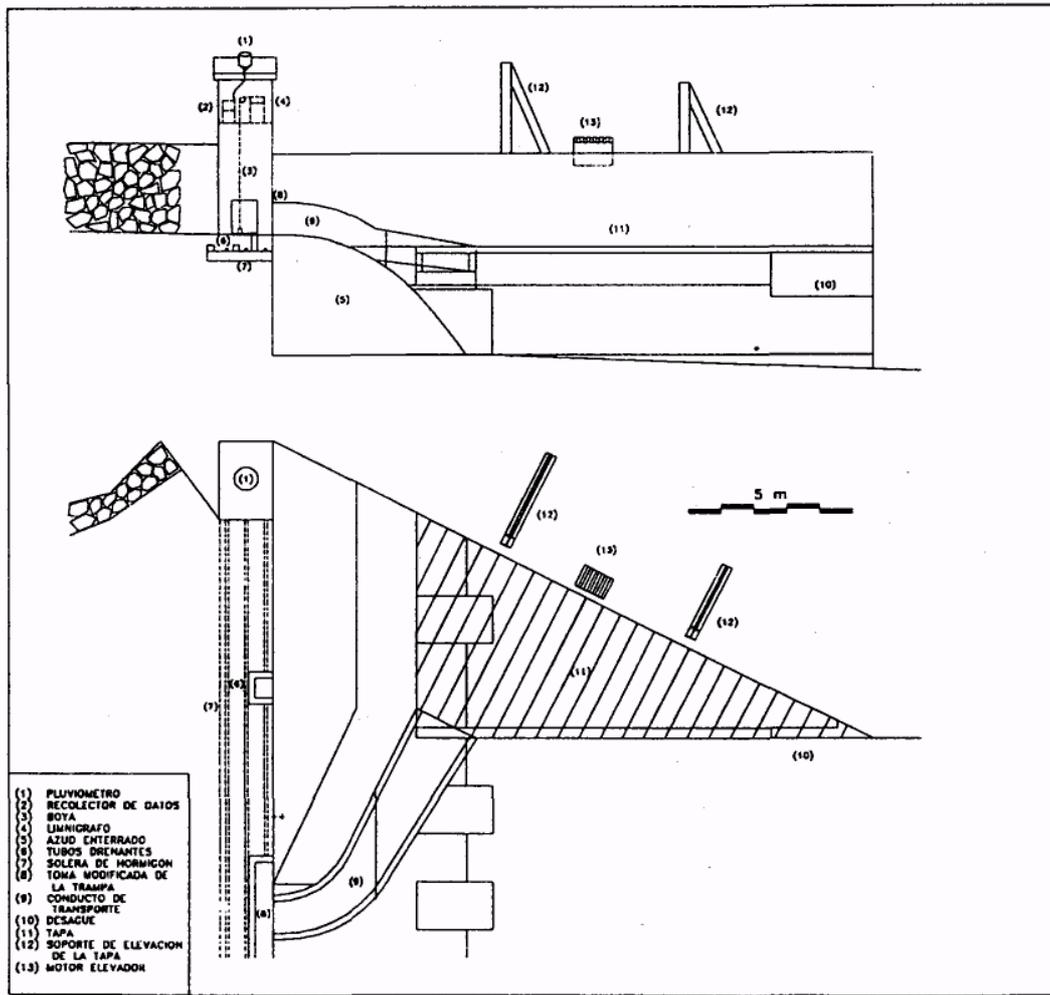


Figura 7 Modificaciones propuestas en la trampa de sedimentos.

Próximamente se construirá una trampa de sedimentos permanente que cambia la concepción pero aprovecha la obra ya realizada. La trampa se transforma en un depósito decantador de 120 m³ tapado con una estructura metálica (salvo un desagüe alto), para que su funcionamiento no sea alterado por la circulación de la avenida (Figura 7). La toma es un conducto estructural con una boca enfrentada a la corriente. La boca es pequeña, a fin de hacer la trampa útil para avenidas mayores y se coloca lejos de la orilla, para conseguir una mayor representatividad. Mediante motor y cabrestante se podrá levantar la tapa para vaciar su contenido tras una avenida.

El análisis hidrológico (Apartado 6) ha mostrado que es interesante diferenciar la cuenca natural o parcialmente urbanizada de la cuenca urbana. Por esta razón se ha establecido un segundo punto de medida de caudal (o estación de aforos) (Figura 2, punto 12). En el lugar

elegido existe un puente protegido por una gran traviesa de hormigón (Figura 15). Esto crea un salto que se aprovecha como control hidráulico. Bajo el tablero del puente se instala un sensor de nivel por ultrasonidos.

CALIBRACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS EQUIPOS

A fin de contar con medidas fiables en la cuenca experimental, se ha realizado una calibración de los pluviómetros y también de la estación de aforos y trampa de sedimentos. Uno de los problemas que presentan los pluviómetros de balancín es el error producido en caso de intensidades elevadas, puesto que miden menos lluvia de la real. Esto se explica por el tiempo que transcurre en el vuelco de las cazoletas, durante el cual la lluvia caída se pierde para el registro automático. En el laboratorio hidráulico se ha desarrollado un aparato portátil para

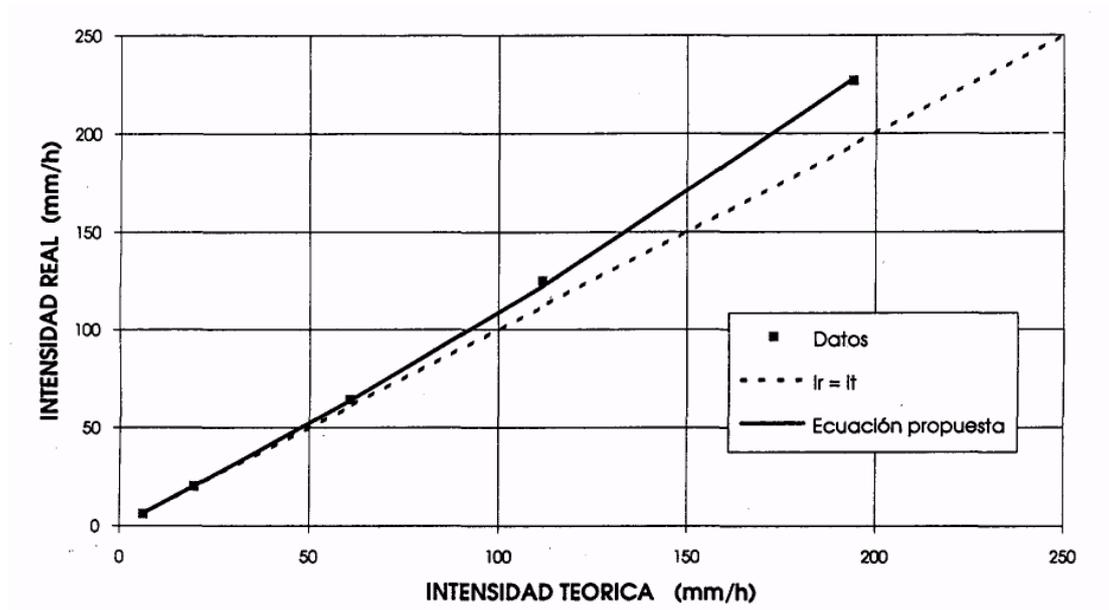


Figura 8 Ajuste in situ de la curva del pluviómetro 2. $\Delta t = 0.309$ s, $V = 0.197$ mm.

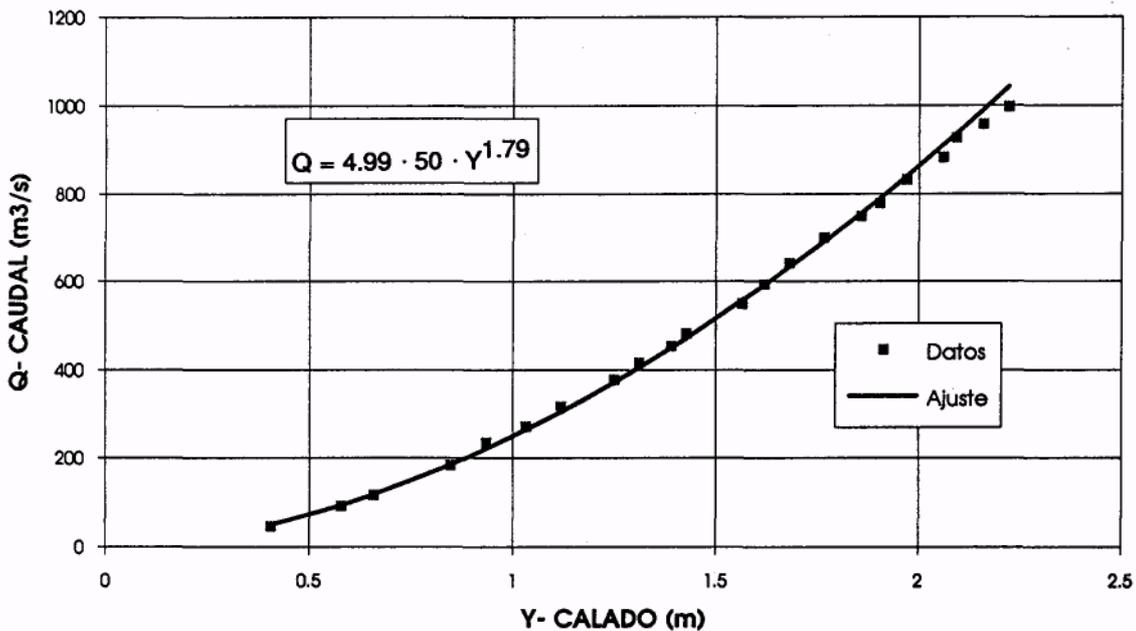


Figura 9 Ajuste de la curva de vertido en la estación de aforos del prototipo.

calibrar pluviómetros. Consiste en un recipiente de nivel constante que deja caer el agua al pluviómetro gota a gota. El goteo es regulable por medio de una pinza, con lo que se simulan diferentes intensidades de 5 a 300 mm/h. El agua pasada se recoge y cubica para compararla con el volumen deducido por el pluviómetro (nº de vuelcos \times capacidad de la cazoleta, calibrada previamente en condiciones estáticas), de modo que puede dibujarse una curva de calibración llamada dinámica, como la Figura 8.

Estas curvas se ajustan por regresión a una ecuación del tipo

$$I_r = \frac{I_t V}{V - \Delta t \cdot I_t} \quad (1)$$

donde V es el volumen contenido en la cazoleta y calibrado estáticamente, I_t es la intensidad teórica a partir del registro del pluviómetro (es decir el cociente

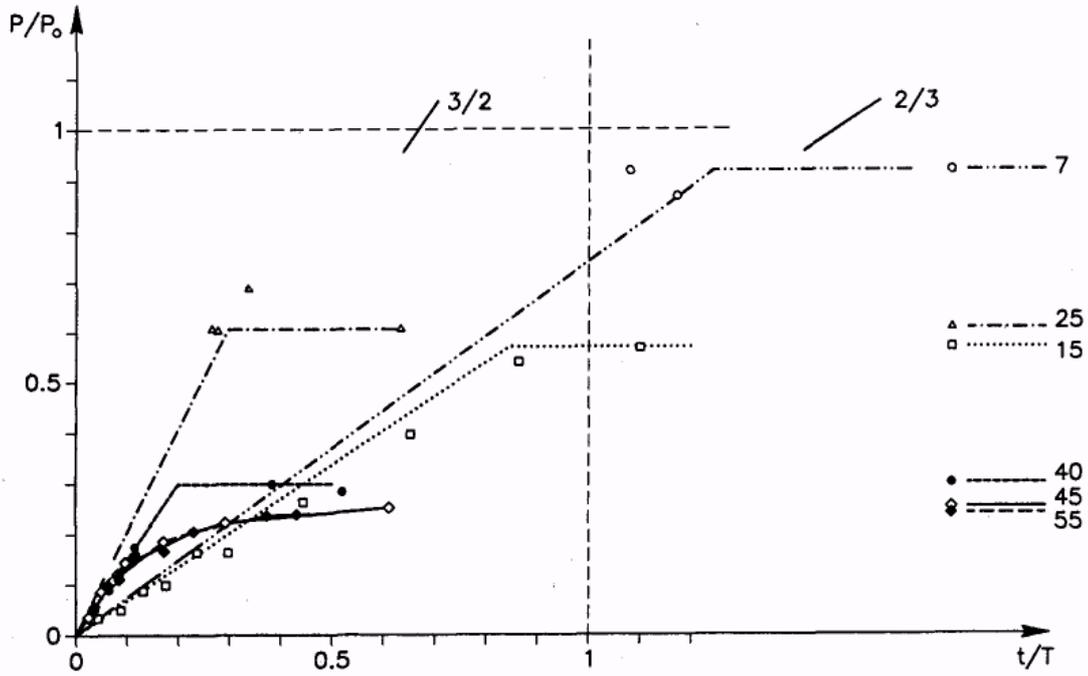


Figura 10 Curva de llenado peso-tiempo adimensional de la trampa provisional.

V/T , donde T es el tiempo de un ciclo completo de llenado y vuelco de cazoleta), Δt es el tiempo de vuelco e I_r es la intensidad real, es decir de vuelco e I_t es la intensidad real, es decir

$$V/(T-\Delta t) \quad (2)$$

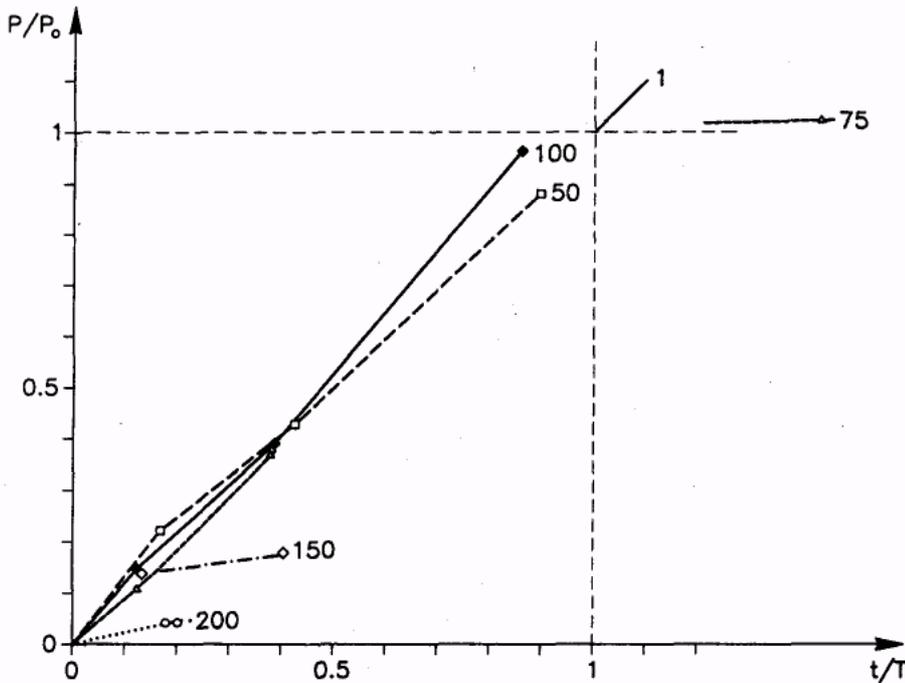


Figura 11 Curva de llenado peso-tiempo adimensional de la trampa definitiva.

El parámetro de ajuste es Δt , siendo I_r e I_t los datos experimentales: la intensidad experimental I_r se obtiene con el volumen recogido en el totalizador, mientras la teórica I_t se obtiene con el volumen registrado a través del número de vuelcos. Como se ve en la figura y en la ecuación, la intensidad real se aparta más de la teórica cuanto más intensamente llueve, porque el volumen perdido durante el vuelco es proporcionalmente mayor.

La estación de aforos y trampa de sedimentos ha sido estudiada experimentalmente en modelo reducido para obtener su curva de desagüe (o curva de gastos) y la eficiencia de captura de sedimentos por la trampa. Esto se ha realizado en un canal hidráulico de pendiente variable, de 20 m de longitud, 60 cm de anchura, pendiente regulable entre el 0 y el 4% y paredes de vidrio. El canal cuenta con una tolva dosificadora de material granular capaz de suministrar caudales sólidos predeterminados entre 0.03 y 1.5 l/s de manera continua y uniformemente repartida en la anchura de 60 cm.

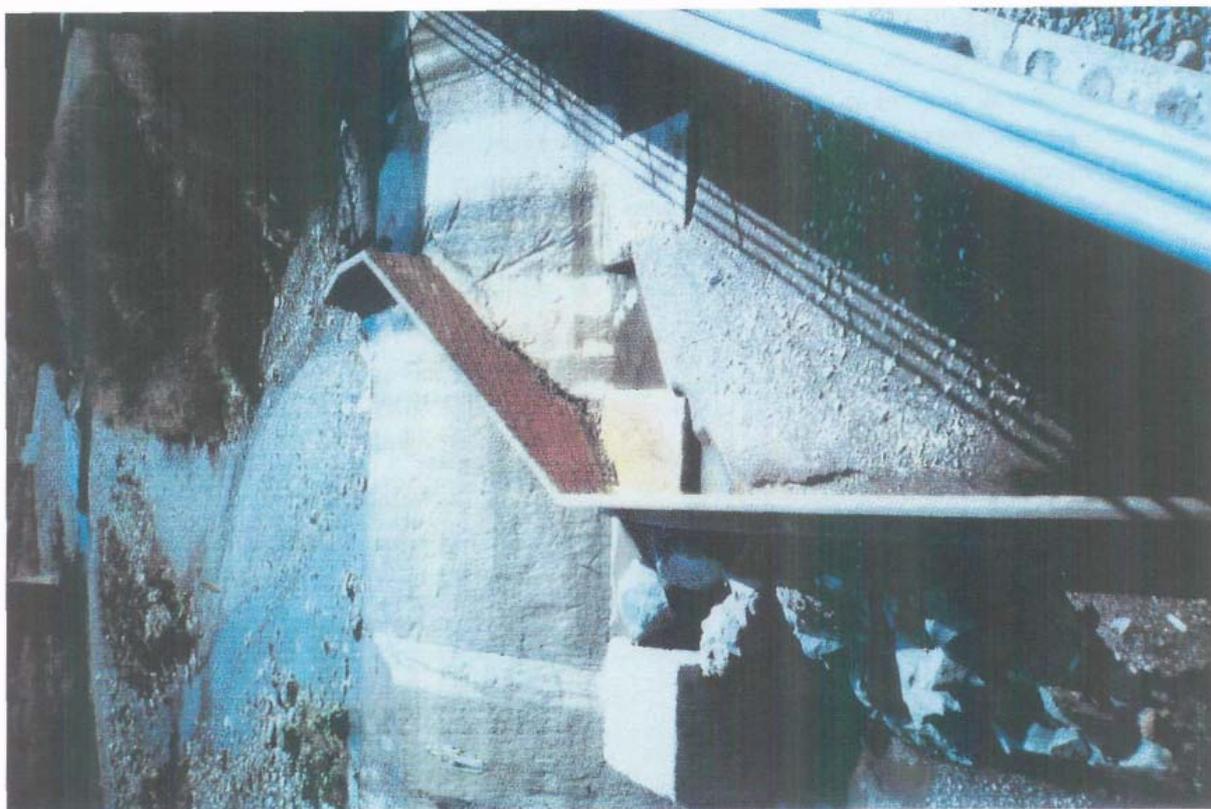


Figura 12 Fotografía del prototipo antes de la avenida del 10 de Octubre de 1994.

El modelo es de lecho fijo con aporte de sedimentos, ya que es la eficacia de retención de la trampa en relación a la tasa sólida suministrada la principal cuestión y no la dinámica fluvial del cauce. El modelo no puede reproducir toda la anchura de la estación de aforos (50 m) dentro del canal, so pena de ser demasiado pequeño. Por el contrario reproduce 14 m de anchura de la estación, a escala 23. La semejanza empleada en el modelo es la de Fronde en cuanto a las variables hidráulicas y la derivada del criterio de Shields en cuanto al material granular: así se emplea arena fina (muy uniforme) de tamaño $D_{50}=0.4\text{ mm}$ y densidad específica igual a la del prototipo, para representar la grava media ($D_{50}=8\text{ mm}$) del cauce a escala 23. La rugosidad del fondo fijo se consigue mediante un revestimiento con mortero de grano 1-2 mm, para representar la fracción gruesa del material del cauce.

Los ensayos hidráulicos de la estación de aforos han llevado a obtener la curva de desagüe en régimen permanente (Figura 9), midiendo el nivel o calado del agua sobre la estructura y por otro lado el caudal de ensayo en un vertedero triangular de aforo en la cabecera del canal. El régimen en el cauce es rápido, razón por la cual la pendiente y la rugosidad tienen influencia en el resultado experimental. El modelo no reproduce la

anchura total junto con las orillas más rugosas, sino un sector central de 14 m confinado entre paredes de vidrio. Con esto indicamos posibles diferencias, muy difíciles de valorar, entre modelo y prototipo. En cambio, no son de temer efectos de escala por fuerzas de tensión superficial o fuerzas viscosas (se dan altos números de Reynolds y láminas vertientes de varios centímetros). La ecuación potencial de ajuste se representa en la Figura 9 y se emplea para convertir los limnigramas en hidrogramas de avenida.

En cuanto a la trampa de sedimentos, los ensayos han permitido estudiar la captación y retención del sedimento y mejorar y sancionar el diseño de la trampa cubierta (Figura 7). En los ensayos con sedimento se mide el peso de arena que ha pasado por la estación y el peso retenido en la trampa, en distintos instantes del proceso de llenado. La expresión resumida de un ensayo es la curva peso retenido - tiempo, que conviene convertir en adimensional empleando como peso de referencia el peso máximo (trampa llena) y como tiempo de referencia un tiempo de desplazamiento (peso máximo / caudal sólido) (Figura 10). Los ensayos se realizan en régimen permanente (caudal constante) y con el caudal sólido más pequeño posible. Se ha comprobado que el valor concreto del caudal sólido no influye en el

modo de llenado ni en el funcionamiento de la trampa sino sólo en la velocidad o ritmo en que ocurre el llenado, jugando así a modo de escala de tiempo del experimento. Asimismo el verdadero caudal sólido de la riera es desconocido: precisamente el proyecto de investigación se propone cuantificarlo. La arbitrariedad que todo esto parece proyectar sobre los ensayos se resuelve gracias a la representación adimensional de las curvas de llenado, válida para modelo (con cualquier caudal sólido de ensayo) y prototipo (independientemente del transporte sólido real).

Para analizar los resultados se emplea el concepto de eficiencia de la trampa (cuánto captura y cuánto retiene la trampa respecto a lo que se le acerca a la boca) y el concepto de límite de funcionamiento (con qué grado de llenado empiezan a escapar partículas). Estos conceptos son útiles para estimar la cifra total de transporte sólido en la riera a partir del volumen encontrado en la trampa en un suceso real. En las Figuras 10 y 11 vemos las curvas de la trampa provisional y la trampa permanente, respectivamente. En la segunda se observa que hasta $100 \text{ m}^3/\text{s}$ la trampa se llena sin limitación (hasta el máximo) con eficiencia unidad, ya que necesita para llenarse totalmente un tiempo igual al de desplazamiento. Para caudales mayores se observan ciertos límites de funcionamiento y llenados sólo parciales. El funcionamiento de la trampa provisional es mucho menos satisfactorio pues ya para caudales bajos ($25 \text{ m}^3/\text{s}$ por ejemplo) no se consigue un llenado elevado. Además el valor de su eficiencia es más irregular.

En las fotos de las Figuras 12 y 13 se compara la trampa de sedimentos provisional en el prototipo y en el modelo hecho en el laboratorio.

El período de observación sistematizada en la cuenca experimental de la riera de Las Arenas abarca del 1-1-1992 al presente (30-7-1995), es decir tres años y medio. En este período se han registrado 6 sucesos destacables, 1 en 1992, 4 en 1993 y 1 (el más importante) en 1994. Calificamos como destacables los sucesos en que la estación de aforos (Figura 2, punto 10) ha registrado el paso de agua, como mínimo con una altura de $Y=15 \text{ cm}$ ($8.4 \text{ m}^3/\text{s}$ según la curva de gastos). En los cinco primeros casos, la trampa de sedimentos ha quedado ocupada en la mitad o más de su volumen. En el último suceso, el dato de la trampa no es aprovechable pues su capacidad fue ampliamente rebasada y además resultó parcialmente destruida. En el período 92-93 no han ocurrido ciertamente precipitaciones extraordinarias. Las máximas precipitaciones en el punto 2, en 24 h, 4 h y 1 h fueron 81.2, 60.3 y 35.0 mm (1992) y 65.9, 35.9 y 32.9 mm (1993). Un observatorio en la cumbre de la cuenca (Figura 2, punto 3) registró una precipitación máxima en 24 h superior a 115 mm en 7 años, de una serie de 14 años hasta 1977. Con este criterio los años 92 y 93 pertenecerían a la mitad de años de baja torrencialidad. Las cinco primeras avenidas observadas en el punto 10 deben considerarse muy pequeñas. El episodio de 1994, por el contrario, fue producido por 124.6 mm en 24 h (86.2 mm en 4 h y 59.4 mm en 1h).

La Tabla 1 ofrece un resumen de los sucesos: dos de ellos (29-4-93 y 22-9-93) tuvieron una precipitación distribuida de modo relativamente uniforme en la cuenca, fueron largas y copiosas, pero no muy intensas, y en ambas la escorrentía de la cuenca natural fue inapreciable (es decir, en la sección de control en el punto 6 no se observaron signos de circulación de agua) y fue modesto el caudal en la estación de aforos. Un suceso más intenso fue el 9-9-92 (cantidad compa-

DATOS DE PEQUEÑAS AVENIDAS

Tabla 1 Subíndices según Figura 2. P:-precipitación total; Q:caudal máx; V:volumen; ip:inapreciable. *:reg. temporal obtenido.

Fecha	9-IX-92	29-IV-93	30-VI-93	12-VIII-93	22-IX-93	10-X-94
Duración (h)	11	15	1	2	55	12
P ₂ (mm)	79'	50*	1	4	98*	125*
P ₅ (mm)	?	60?	85	?	90	102
P ₇ ,P ₈ ,P ₉ (mm)	22*[P ₇]	78[p ₈]	ip.	55[P ₈]	80?	79*[P ₉]
Q ₆ (m ³ /s)	30-40	ip.	70-90	ip.	ip.	?
Q ₁₀ (m ³ /s)	15	18	12.8*	25.6*	10.5*	96*
V ₁₁ (m ³)	400	>700	750	650	800	?

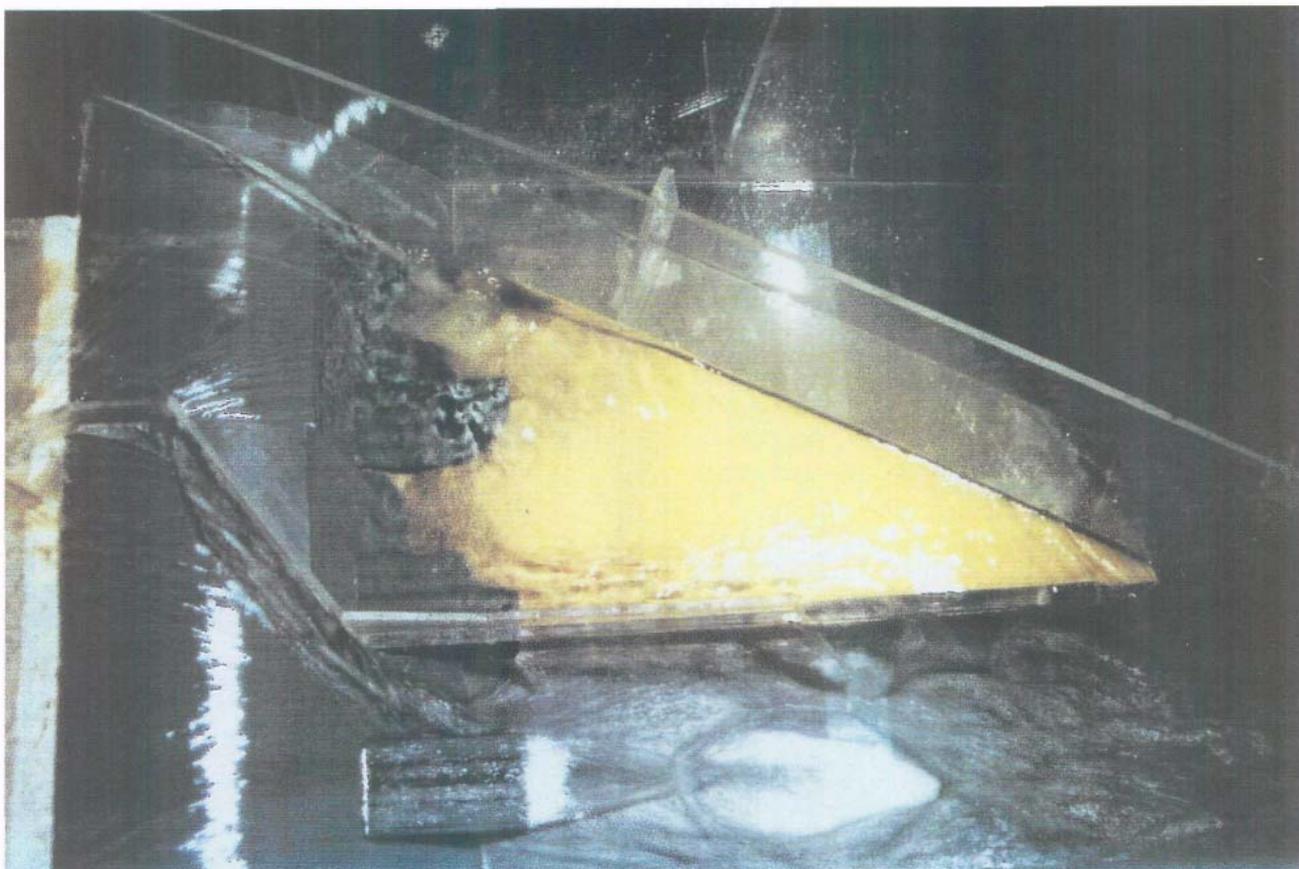


Figura 13 Fotografía del modelo de la trampa de sedimentos.

rabie y menor duración) el cual sí dio escurrimiento en la cuenca natural y también en la estación de aforos, pero menor en esta última, a pesar de encontrarse aguas abajo. Dos fenómenos dignos de análisis son el umbral de escorrentía de la cuenca de 24 km^2 (acolado entre los sucesos del 29-4-93 y el 9-9-92) y las pérdidas en el cauce entre los puntos 6 y 10. Los otros dos sucesos del período 92-93 son muy irregulares. El del 30-6-93 es extremadamente intenso e irregular (sólo llueve en el centro de la cuenca y la cantidad en 1 h supera a todas las otras), causa el mayor escurrimiento en la sección de control (6), pero también muestra ejemplarmente las pérdidas en el cauce, pues el caudal en 10 se redujo a $1/6$ (y no llovió en la cuenca urbana). El 12-8-93 sólo llueve en la zona urbana de la cuenca, menos intensamente y

sobre una superficie menor, pero causa en la estación de aforos el caudal mayor de todo el período. La tabla pone de manifiesto la disociación en el comportamiento hidrológico de las partes superior (24 Km^2) e inferior ($+6 \text{ Km}^2$) de la cuenca. La inferior, muy estrecha y alargada, sería capaz de producir caudales considerables por su carácter urbano. Pero también el cauce de la riera serviría de desagüe de la cuenca, transportando los caudales de la parte superior, aunque con importantes pérdidas. La tormenta del 30-6-93 da una idea de las tormentas convectivas mediterráneas que caen sobre superficies muy pequeñas con gran intensidad. Esto pone en evidencia la dificultad de relacionar las máximas precipitaciones y los máximos caudales en una cuenca torrencial.

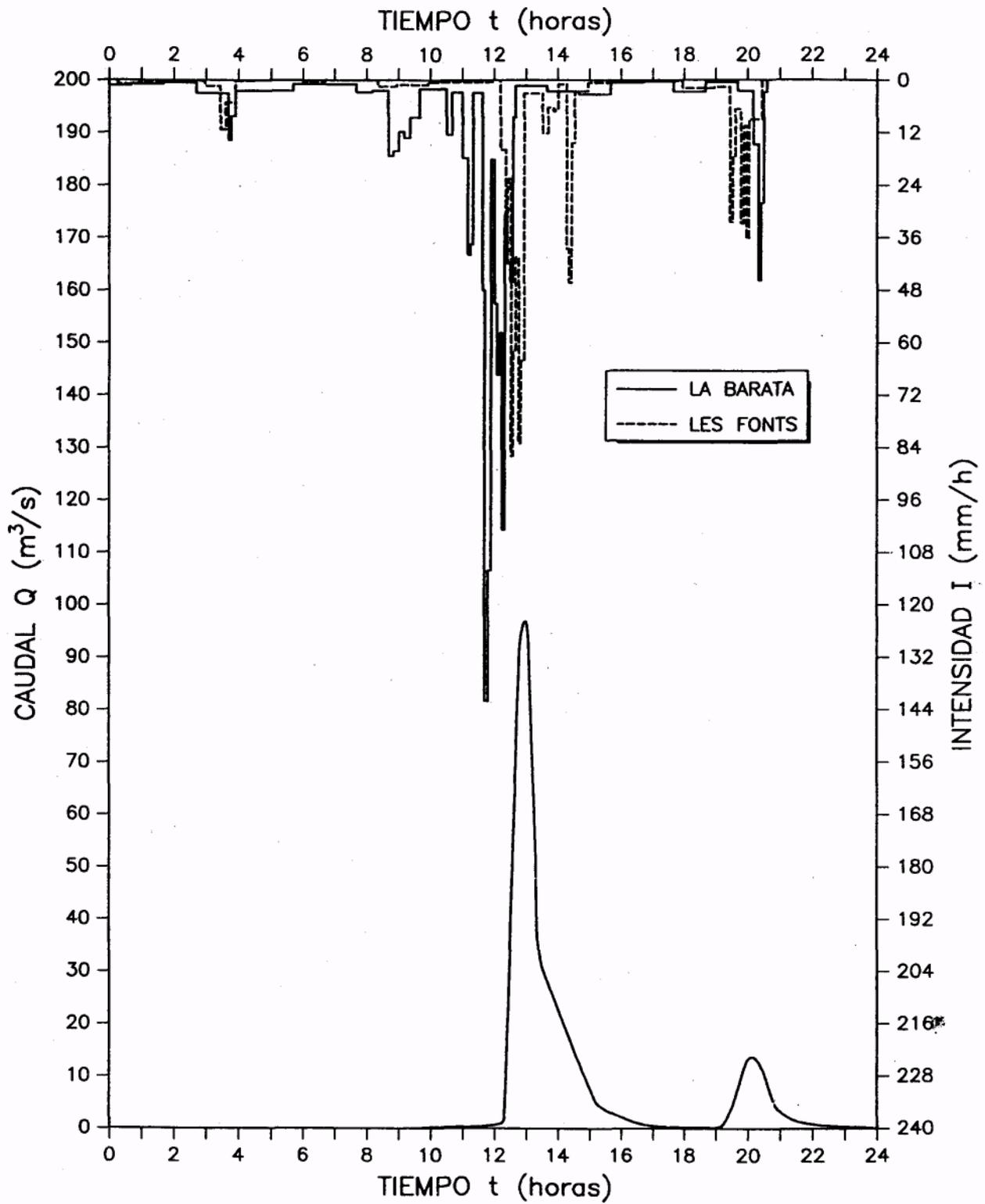


Figura 14 Avenida del 10 de Octubre de 1994.



Figura 15 Puente sobre la riera de Las Arenas a las 13h del día 10 de Octubre de 1994.



Figura 16 Subcuencas para el análisis hidrológico

En cuanto al suceso del 10-10-94, la Figura 14 es la representación gráfica de los hietogramas en los puntos 2 y 9 y el hidrograma registrado en 10. El paso de tiempo de los hietogramas (agregando información más detallada) es de 5 minutos, mientras la resolución posible del limnigrama, con el que se dibuja el hidrograma, es de 15 minutos. Además de estos datos se sabe también la precipitación total en la cabecera de la cuenca (punto 1), que ascendió a 150 mm y el caudal a las 13 h en el punto 12: la figura 15 es una instantánea de vídeo del puente que sirve como estación de aforos (punto 12) a tal hora del día 10 de Octubre. Gracias a la filmación y mediante la ecuación de desagüe deducida para el salto, se ha obtenido que ascendió a 140 m³/s.

Cabe indicar que la precipitación en la cuenca fue notable pero inferior a la de cuencas próximas y a la de otras áreas del prelitoral catalán. La riera de Las Arenas no se destacó por su avenida en

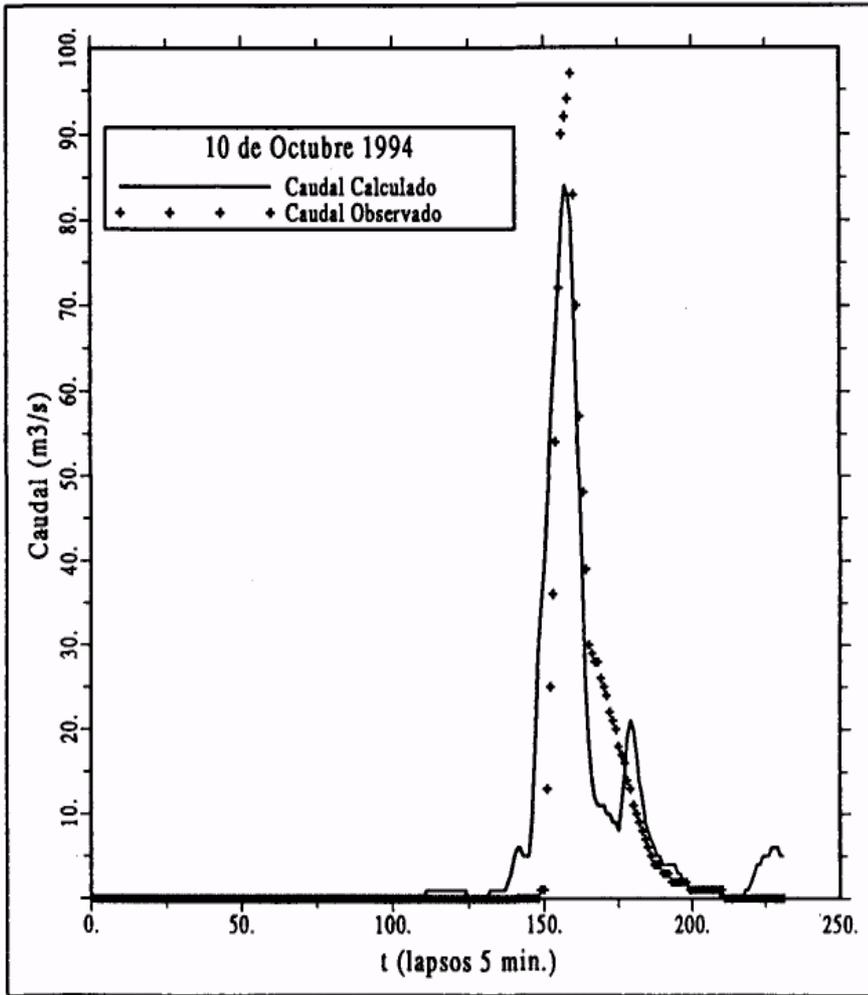


Figura 17 Comparación entre medidas y cálculo hidrológico, en el suceso del 10-10-94

esta ocasión. La distribución de la lluvia indica claramente un gradiente positivo (79, 102, 125, 150 mm) hacia el Norte o sea hacia la montaña. Asimismo se

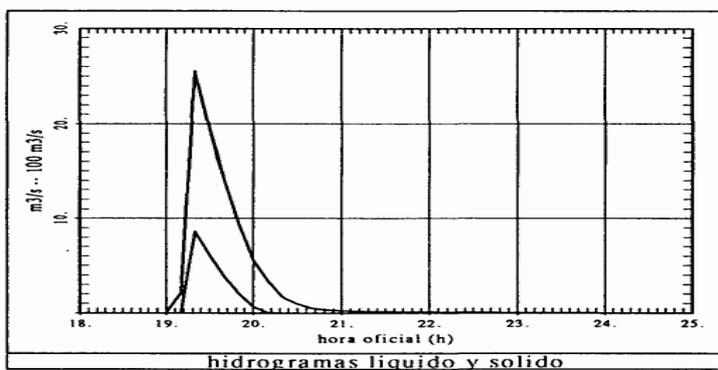


Figura 18 Hidrograma real y sedimento grama supuesto del 12-08-93.

observa una diferencia temporal, pues la lluvia torrencial fue más temprana en la montaña que en el llano. Por otra parte, en los 20 días anteriores al 10 de Octubre, el pluviómetro en el punto 2 había totalizado nada menos que 215 mm: el otoño estaba siendo muy húmedo.

ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LA CUENCA

Se ha analizado la respuesta hidrológica de la cuenca mediante el modelo HEC-1, con la intención de examinar la aplicabilidad de un modelo simple, y muy utilizado en ingeniería, a una cuenca torrencial mediterránea y realizar en su caso una pre-calibración de sus parámetros con los primeros datos. La cuenca se ha dividido en tres sub-cuencas (Figura 16) de distinta pendiente, vegetación y uso del suelo. Esta división sirve también para aprovechar los datos de sucesos con precipitación no generalizada. Se emplea el método del SCS para las pérdidas, fijando la pérdida inicial en el 20% de la capacidad de almacenamiento y manteniendo el factor número de curva como primer parámetro de

ajuste. Se emplean también las expresiones para tener en cuenta el estado de humedad precedente en la cuenca (ver por ej. (Chow et al., 1988)). Se utiliza el hidrograma unitario del SCS como transformación de la lluvia neta en escorrentía. El tiempo de retardo de este hidrograma sirve como segundo parámetro de ajuste. Además de la propagación (método de Muskingum), en los cauces se incorpora una pérdida por infiltración como función lineal del caudal circulante.

La principal conclusión del análisis es que el modelo HEC-1 es capaz de reproducir el funcionamiento hidrológico de la cuenca. Como muestra, se presenta en la Figura 17 la comparación entre el hidrograma observado y el calculado en el suceso del 10-10-94. A este resultado se ha llegado aprovechando los sucesos de 1992-93 (aunque la información sea

ANÁLISIS DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

incompleta) para caracterizar la escorrentía de las subcuencas y las pérdidas en los tramos de cauce. Los valores del número de curva para condición normal de humedad precedente (I: 60, II: 80, III: 89) y tiempo de retardo (I: 0.20h, II:0.10h, III:0.31h) son normales y conformes con estimaciones que se hubieran hecho a priori. Sin embargo, el análisis habría dado resultados muy equivocados si no se hubieran tenido en cuenta las pérdidas en los cauces: el cauce II pierde un 10% del caudal y el cauce III pierde nada menos que un 65% del caudal.

Una consecuencia de este hecho es que el volumen total escurrido es escaso comparado con el volumen total precipitado. El primero es relativamente exacto una vez calibrada experimentalmente la estación de aforos. El segundo puede estimarse razonablemente gracias a la densidad de pluviómetros. Su cociente es el coeficiente de escorrentía global. Para la copiosa y duradera lluvia del 22-9-93 resulta un 4% solamente (este temporal estuvo precedido de un verano seco aunque cayeron 24 mm en las anteriores 72 h). Para la intensísima y localizada (sobre unos 5.5 Km², subcuenca II) tormenta del 30-6-93 resulta sólo un 9.8% en la estación de aforos. Este resultado tan bajo incluye las

Con los tres últimos sucesos del año 1993 se ha intentado una primera verificación de la ecuación de Meyer-Peter y Müller (MPM), una de la ecuaciones de transporte sólido de fondo más utilizadas en caso de grandes pendientes y material grueso. Se dibuja un sedimentograma (diagrama de caudal sólido) obtenido por aplicación de la ecuación a los datos del hidrograma medido en la estación. La ecuación MPM se aplica así como una función de transformación de hidrograma en sedimentograma, haciendo uso de una hipótesis que podríamos llamar cuasi-permanente. La Figura 18 es la representación de estos diagramas en el suceso del 12-8-93.

El volumen total de sedimentos que se deduciría de la Figura 18 es de 127 m³. La misma operación con los datos del 30-6-93 da 93 m³ y con la del 22-9-93 da 83 m³. Comparando con los registros de la trampa (tabla 1), resulta que la predicción de la ecuación MPM en régimen de avenida daría un volumen entre 6 y 10 veces menor que el real.

Hay que recordar que la trampa provisional tiene su boca junto a la orilla lo que puede restar representa-

Tabla 2 Correlación tamaño del sedimento-caudal máximo.

Fecha	9-IX-92	29-IV-93	30-VI-93	12-VIII-93	22-IX-93	10-X-94
Q(m ³ /s)	15	18	12.8	25.6	10.5	96
D _m (mm)	14.2	10.2	8.7	16.0	8.4	47.9

pérdidas en el cauce. La tormenta del 12-8-93 intensa, localizada en zona urbana (subcuenca III) y con menor longitud de cauce hasta la estación de aforos da un 15% en ella. Finalmente, en la avenida del 10-10-94 resulta un 12.5%.

Las pérdidas en el cauce sugieren la evaluación de una permeabilidad efectiva o global (k) como el volumen total perdido (m³) dividido por el área de cauce mojada y la duración de la escorrentía. Esto puede aplicarse con cierta propiedad al cauce III y al suceso del 30-6-93, resultando k=0.05 cm/s, que debe considerarse estimativo y relativamente conforme con los datos publicados (Lane, 1982), aunque mayor que los ensayos in-situ con infiltrómetros y agua clara.

tividad a las medidas de campo. Es interesante indicar que estos volúmenes reales transportados representan el 1.2%, el 0.8% y el 0.7% (22-9-93) del volumen líquido total o aportación de la avenida. La comparación resultaría aún peor en caso de emplear el tamaño medio del material del cauce (D_m=30 mm) en la fórmula MPM en lugar del tamaño medio transportado en estas pequeñas avenidas, conocido mediante el material extraído de la trampa. En efecto, aprovechando el vaciado de la trampa se han tomado muestras para ensayo granulométrico. Los tamaños medios aritméticos obtenidos indican cierta correlación con los máximos caudales en la estación (Tabla 2). Esto indicaría que cuanto mayor es la avenida más presencia tiene en el transporte de fondo la fracción gruesa del material del lecho.

CONCLUSIONES

La investigación se centra en una cuenca de 30 Km² de funcionamiento torrencial, con un cauce seco de alta pendiente. La información de las estaciones pluviométricas, de la estación de aforos y de la trampa de sedimentos (calibrada en modelo reducido) en 5 pequeñas avenidas en 1992 y 1993 y en la avenida más importante del 10-10-94, indica diversos fenómenos de interés hidrológico e hidráulico: bajos coeficientes de escorrentía globales, altos volúmenes de transporte sólido y considerables pérdidas de volumen de escorrentía por permeabilidad del cauce.

LISTA DE SÍMBOLOS

- D:** Tamaño de grano del material del cauce.
- I:** Intensidad de precipitación.
- k:** Permeabilidad del cauce.
- P:** Precipitación / Peso de material retenido en la trampa.
- Q:** Caudal.
- t:** Tiempo.
- V:** Volumen de agua / Volumen de sedimento.
- Y:** Calado de agua.
- σ : Desviación típica de la granulometría.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha contado con la ayuda del proyecto AMB92-0638 de la CICYT. Agradecemos la colaboración de la Junta de Aguas de la Generalitat de Cataluña, la Diputación de Barcelona, el Instituto Nacional de Meteorología y los Ayuntamientos de Matadepera, Terrassa y Rubí.

Han participado en distintas partes del trabajo Ricard Ferrer, Alberto Casart, Celso García García y Cristina Pérez Platas.

BIBLIOGRAFÍA

- Martín Vide, J (1992) Características extremas de la precipitación en la España mediterránea. Inundaciones y Redes de Drenaje Urbano. Colegio de Ingenieros de Caminos de Madrid.
- Rosselló, R. (1992) Estudi hidrològic de la riera de Les Arenes. Tesina de especialidad. Escuela de Ingenieros de Caminos de Barcelona.
- López Bustos, A. (1964) Resumen y conclusiones de los estudios sobre avenidas del Valles en 1962. Instituto de Hidrología, Madrid.
- Lane, L.J (1982) Distributed Model for Small Semiarid Watersheds. Journal of the Hydraulic Division, ASCE, vol. 108, n°10, pp 1114-1131.
- Chow, V.T; Maidment, D.R; Mays, L.W. (1988) Applied Hvdrology. McGraw Hill Book Co.