

# CONSECUENCIAS HIDROLÓGICAS DE LOS INCENDIOS FORESTALES

Daniel Sempere<sup>1</sup>, Alvaro Urbano<sup>1</sup>, Jacques Lavabre<sup>2</sup> y Josep Dolz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dep. de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. E.T.S.I.C.C. y P.  
Universitat Politècnica de Catalunya. Gran Capitán D-1, 08034 Barcelona

<sup>2</sup>CEMAGREF. Le Tholonet B.P. 31, F-13612 Aix-en-Provence, Francia

**RESUMEN:** La alteración del terreno y la destrucción de la vegetación debida a los incendios provoca cambios importantes en las características hidrológicas de las cuencas afectadas. El presente estudio aborda una cuantificación de los efectos inducidos por el fuego en los caudales punta y en la modificación de la respuesta hidrológica de una pequeña cuenca mediterránea francesa gracias a la disponibilidad de una serie de 23 años de datos antes del incendio y de 3 años después. La relevancia de las consecuencias puestas de manifiesto resulta especialmente crítica en la región mediterránea, donde una climatología propicia convierte a la secuencia fuego-inundaciones-erosión en el principal agente del proceso de desertificación.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los incendios forestales se han convertido en España en una plaga que asola año tras año los bosques de nuestro país. Cientos de miles de hectáreas de bosque se han destruido. En los últimos años, habiendo sido 1994 un año aciago con una superficie quemada del orden de 10 veces mayor a la de 1993.

La magnitud de las repercusiones de estos incendios ha ido calando progresivamente en la conciencia colectiva: las pérdidas en vidas humanas, en bienes materiales y en los recursos ligados al bosque han llevado a articular diversas acciones de prevención y coordinación de las, respuestas. Sin embargo la conjunción de una climatología propicia con el progresivo abandono de las tareas tradicionales de conservación forestal parecen no tener una solución sencilla, especialmente en la franja mediterránea, donde los fuegos parecen haber adquirido una frecuencia prácticamente anual.

Las importantes repercusiones socio-económicas de los incendios no permiten sin embargo olvidar la degradación ambiental que representan en regiones de por sí amenazadas por el fantasma de la desertificación: la pérdida de suelo ocasionada por el binomio fuego-lluvias intensas y la posterior dificultad para la recuperación de

la capa vegetal es en sí un factor desencadenante de primer orden de dicho proceso.

En este contexto cabe preguntarse acerca del impacto hidrológico de los incendios. En una época donde el agua se perfila como uno de los recursos naturales esenciales de los próximos años, y a la vez como el agente de riesgo natural más importante de nuestro país (inundaciones, erosión, transporte de sedimentos, etc. Dolz (1993)), es importante analizar las consecuencias de una modificación esencial de las características de las cuencas tanto sobre la cuantificación de los aportes como sobre la generación de puntas de caudal.

En las inundaciones del pasado mes de Octubre en Cataluña, parece ser que las cabeceras quemadas de algunos ríos (caso del Tenes y del Calders) han jugado un papel crucial en el aumento de las aportaciones, del volumen de sedimentos y de cuerpos flotantes transportados, así como en la aceleración de los procesos. Ello ilustra la necesidad de poder tener en cuenta de una manera objetiva los efectos hidrológicos de la quema de una parte de la cuenca.

El presente estudio pretende abordar una primera cuantificación de dichos efectos en los caudales punta para el caso de una pequeña cuenca experimental mediterránea.

ÁMBITO DEL ESTUDIO

El impacto hidrológico de los incendios no es un tema excesivamente estudiado. Esto proviene sin duda de la dificultad de poder contrastar datos hidrológicos fiables antes y después de un incendio. En general el interés científico por una zona quemada comienza después del incendio, y por lo tanto es difícil poder contar con la información necesaria del antes y del después. Una alternativa es la selección de cuencas gemelas y la utilización de incendios controlados sobre una de ellas. Al mantener la otra sin quemar puede servir de control al ser comparada con la primera. La dificultad estriba en el grado de similitud de dichas cuencas y en la necesidad de planear el experimento con suficientes años de anticipación como para poder disponer de una serie de datos suficientes a fin de establecer correctamente las relaciones hidrológicas entre las cuencas gemelas (un ejemplo de esta metodología es presentado por Scott (1993)). La otra alternativa es disponer de una cuenca con una serie de datos suficientemente larga y con suficientes estudios de caracterización hidrológica como para poder comparar los efectos del antes y el después. Las dificultades de ambas metodologías determinan lo inhabitual de esta clase de estudios.

Clásicamente los trabajos de Anderson (1949); Anderson et al. (1976); Brown (1972); Rowe et al. (1954) y Tiedemann et al. (1979) habían permitido constatar que, como principio general, se produce un aumento considerable de la escorrentía tras los incendios, especialmente importante en periodo de lluvias intensas. Este efecto ha sido ligado al fenómeno de la creación de una costra hidrófuga en la superficie del suelo inducida por el fuego (DeBano (1971); DeBano y Krammes (1966)), que determina la práctica anulación del fenómeno de la infiltración, con la consiguiente generación anómala de escorrentía superficial, y la aceleración de las velocidades de escurrimiento, si no de forma general en toda la cuenca al menos localmente allí donde la temperatura del fuego ha sido mayor. Por otro lado la pérdida de la vegetación incide de forma determinante en la anulación de las pérdidas por interceptación y por transpiración Chandler et al., 1983). Así, aunque las pérdidas por evaporación puedan ser mayores, el efecto global es el de un aumento de las aportaciones especialmente ligadas a los caudales rápidos que generan las crecidas. Sin embargo sólo recientemente (Lavabre et al. (1991); Lavabre et al. (1993); Scott (1993); Scott y Van Wyn (1990)) se ha retomado el tema enfocándolo de cara a la cuantificación de la modificación de la respuesta hidrológica.

El presente estudio se centra en el análisis de los datos de la cuenca del Rimbaud (43° 14' N, 6° 13' E), una

pequeña subcuenca (1,46 Km<sup>2</sup>) del conjunto de cuencas experimentales del Réal Collobrier, situada en el macizo de los Maures en la región mediterránea francesa (Ver Figura 1).

En estas cuencas experimentales se dispone de 17 pluviógrafos distribuidos sobre una superficie de unos 100 Km<sup>2</sup>, de una estación meteorológica completa y de 11 estaciones de aforo dispuestas en forma de cuencas encajadas con áreas de 70 ha a 70 Km<sup>2</sup>. En algunas de ellas se dispone de sensores de temperatura y de conductividad del agua así como de tomamuestras automático. El CEMAGREF (*Centre d'Etudes du Machinisme Agricole, du Genie Rural des Eaux et des Fôrets*) las mantiene de forma continuada desde el año 1966, lo cual ha permitido realizar un gran número de estudios Lavabre (1990).

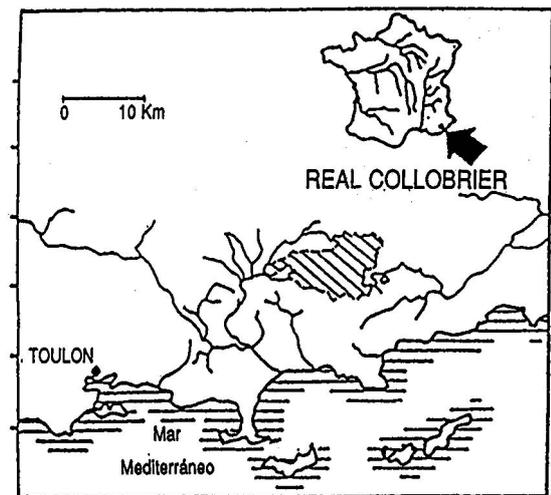
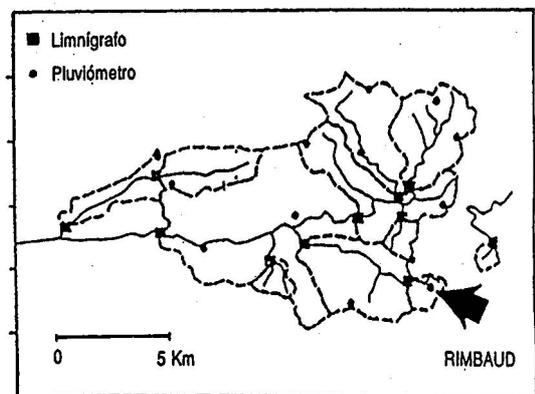


Figura 1: Localización de la cuenca del Réal Collobrier y de la subcuenca del Rimbaud.

Las características climáticas, geológicas y de vegetación (ver Tabla 1) la convierten en una cuenca representativa de la zona Mediterránea húmeda con poca influencia antropogénica (muy similar a las cuencas de las montañas catalanas de la cadena litoral, de Prades o del Montseny). La cercanía del mar (unos 15 Km) y sus elevaciones de más de 500 m determinan una pluviometría anual relativamente alta, que se distribuye esencialmente entre Invierno y Primavera, con marcadas sequías estivales. Las intensidades de lluvia más importantes se registran en los episodios de otoño. En dichos episodios se suelen registrar crecidas importantes siendo el máximo caudal punta registrado en los 27 años de medidas de  $15.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  ( $10.7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ Km}^{-1}$ ). Los caudales suelen desaparecer durante la estación seca (de Julio a Septiembre) reapareciendo de forma

los obtenidos los 3 años hidrológicos posteriores (1990/91-1992/93). Cabe destacar que más allá del tamaño de la superficie, o de la siempre discutible representatividad de la cuenca, la cantidad y la calidad de los datos hidrológicos disponibles convierten a este caso en un punto de referencia de primer orden.

### ANÁLISIS HIDROLÓGICOS PREVIOS

En los años posteriores al incendio, la lluvia total anual alcanza valores de 983 mm (1990/91), 755 mm (1991/92), 1022 mm (1992/93). Son valores situados por debajo de la media, pero que se encuentran claramente por encima de los años anteriores, en los que no se superaron los 600

*Tabla 1: Características de la cuenca del Rimbaud.*

<i>Superficie</i>	<i>146 ha</i>
<i>Distancia al mar</i>	<i>15 Km</i>
<i>Rango de altitudes</i>	<i>470-670 m</i>
<i>Vegetación</i>	<i>Maquis, alcornoques y castaños</i>
<i>Geología</i>	<i>Esencialmente gneiss poco alterado</i>
<i>Influencia humana</i>	<i>Marginal</i>
<i>Precipitación media anual</i>	<i>1160 mm</i>
<i>Caudal medio diario</i>	<i>20 l.s<sup>-1</sup></i>
<i>Caudal máximo observado</i>	<i>15.6 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup></i>
<i>Caudal de periodo de retorno 10 años</i>	<i>7 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup></i>

permanente tras los primeros episodios de lluvia, en general hacia finales de octubre.

En Agosto de 1990 el fuego asoló esta región de la costa francesa (más de 8.000 ha destruidas en tres días) quemando parcialmente el Real Collobrier, y en el caso de la subcuenca del Rimbaud calcinando un 85% de su superficie. Dada la época, la ausencia de actividad de limpieza y explotación del bosque y la sequía acumulada en los años anteriores, el fuego puede considerarse de gran intensidad.

El presente artículo compara los datos de los 23 años hidrológicos previos al incendio (1967/68 -1989/90) con

mm. Sin embargo el análisis de los caudales acumulados anuales muestra que con posterioridad al incendio escurre un porcentaje sensiblemente mayor de agua. Lavabre et al. (1993) cuantificaron por diversos métodos este aumento de las aportaciones anuales entre un 25 y un 30% para el año posterior al incendio.

La Figura 2 muestra la comparación de las pérdidas anuales (lluvia anual - caudal acumulado anual) de dos subcuencas del Real Collobrier: el Rimbaud y el Vaubarnier.

Esta segunda cuenca de 148 ha, vecina de la primera, no fue afectada por el incendio y permite ser utilizada como cuenca de control para esta comparación. Los puntos de

los años posteriores al incendio están fuera de la envolvente de los años anteriores. En particular el punto del año inmediatamente posterior al incendio (1990/91), es el valor de pérdidas anuales más bajo jamás registrado por el Rimbaud y muestra la severidad de la influencia del fuego.

Sin embargo este aumento de las aportaciones no se reparte uniformemente sobre todo el año. El efecto es mucho más acusado en los periodos de crecidas, donde el aumento de los caudales se hace mucho más evidente. La Figura 3 compara una serie de puntas de caudal diario observado frente al resultado de la utilización de un modelo hidrológico calibrado sobre los años previos al incendio (Lavabre et al. (1993)): el aumento de las aportaciones se concentra en los caudales de recesión, que se ven de hecho reducidos.

La principal consecuencia de estos resultados es el interés de abordar el estudio de la modificación del régimen de avenidas y del aumento del caudal punta.

**EFFECTOS DEL INCENDIO EN LOS CAUDALES PUNTA**

Como ya se ha dicho, todos los estudios previos coinciden en señalar el aumento significativo de los caudales punta como el efecto hidrológico más relevante de los incendios.

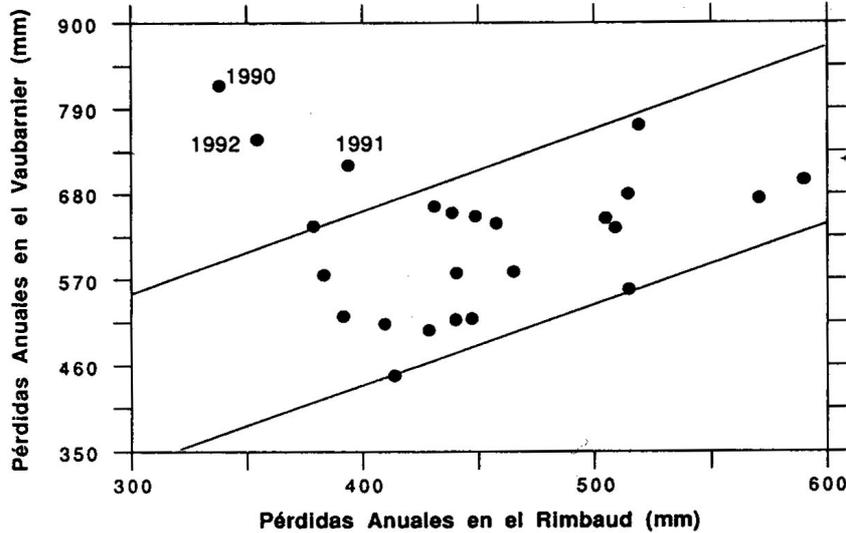


Figura 2: Comparación de las cuencas del Rimbaud y el Vaubarnier. El año 1990 refleja la severidad de la influencia del fuego. El año 1991, con una pluviometría inferior a 1990 y 1992, muestra una reducción del efecto.

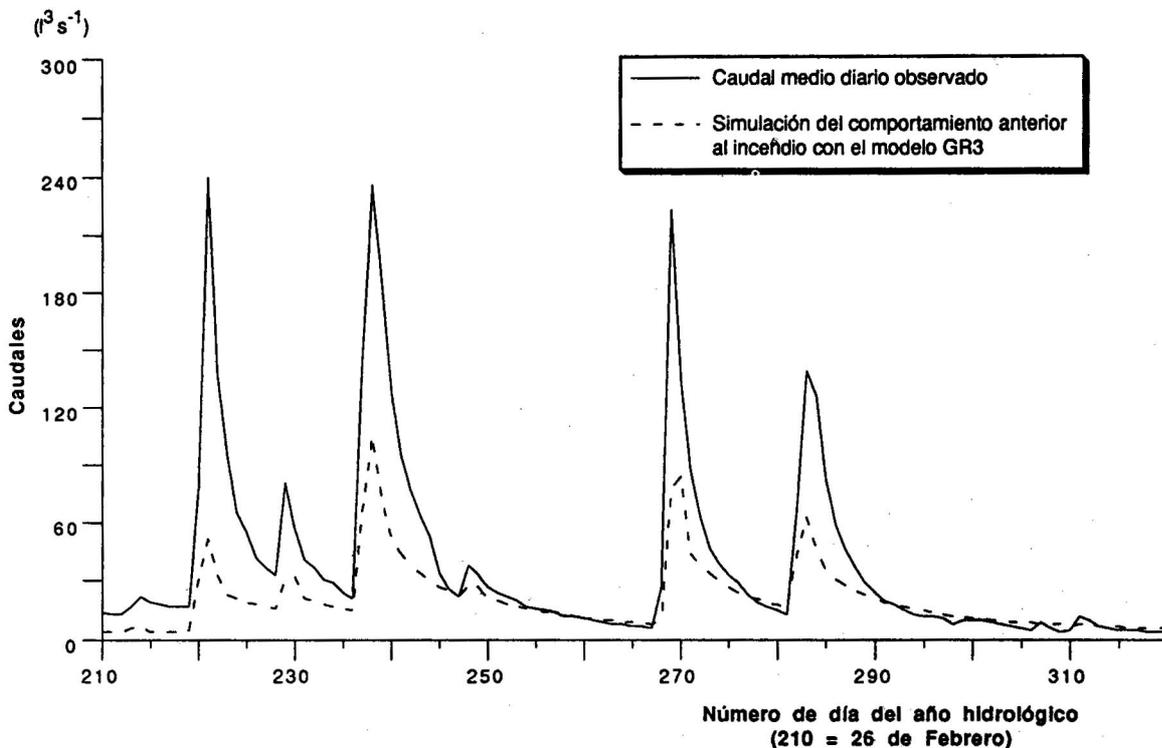
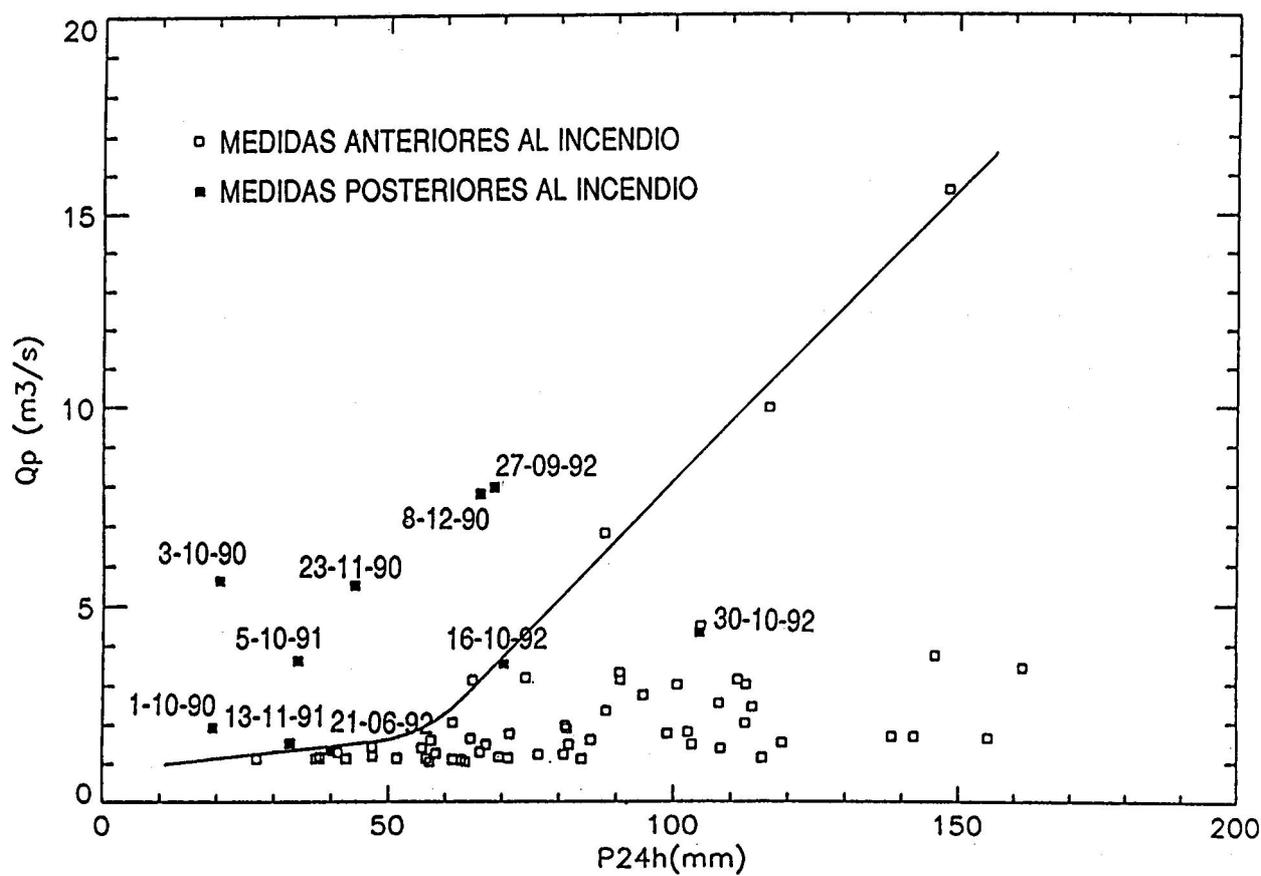


Figura 3: Comparación de los caudales medios diarios observados del año 1990/91, con los propuestos por el modelo GR3 (Periodo del 26 de Febrero al 16 de Junio de 1991, Lavabre et al. (1993)).



**Figura 4:** Caudales punta antes del incendio ( $\square$ ), y después del incendio ( $\blacksquare$ ). La curva representa la envolvente máxima de los caudales punta antes del incendio. Se observa que después del incendio los nuevos valores de caudal punta sobrepasan. Sin embargo los puntos correspondientes al año 1992 se acercan de nuevo a la región interna de la envolvente

Nuestro objetivo es cuantificar dicho aumento. Para ello se ha analizado las 52 crecidas anteriores al incendio con caudales punta superiores a  $1\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$  ( $0.7\text{ m}^3\text{ s}^{-1}\text{ Km}^{-1}$ ), y las 10 registradas en los 3 años hidrológicos posteriores al incendio (1990/91-1992/93).

La Figura 4 muestra la distribución de los caudales punta  $Q_p$  anteriores al incendio frente a la variable de referencia  $P_{24}$  (lluvia acumulada las 24 horas precedentes a la punta de caudal).

Se puede apreciar que existe una especie de envolvente límite para el rendimiento de la  $P_{24}$  que puede considerarse como un límite antes del incendio para la generación de  $Q_p$ . La superposición de los  $Q_p$  posteriores al incendio permite constatar que:

- Los puntos posteriores al incendio se hallan generalmente fuera de la envolvente, mostrando claramente el cambio de la respuesta hidrológica de la cuenca.
- Los episodios inmediatamente posteriores al incendio

(otoño de 1990) registran valores de  $Q_p$  absolutamente fuera de lo común: 1 episodio al mes de más de  $5\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$  ( $Q_p$  de periodo de retorno de 5 años antes del incendio =  $3.5\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ ), y en menos de dos años 2 episodios de más de  $7\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$  (caudal de periodo de retorno de 10 años antes del incendio, ver Tabla 3). El gráfico permite así mismo comprobar que esos valores se producen para lluvias anteriores que no se pueden considerar como extraordinarias.

- Se observa una cierta evolución temporal en la posición de los episodios después del incendio que les lleva a irse acercando a la envolvente. Parece pues que los episodios de 1992 comienzan a perder el carácter de extraordinarios para pasar a acercarse a la nube general de antes del incendio. Esta evolución podría ser explicada como el efecto de la revegetación natural progresiva a partir de la primavera siguiente al incendio.

A la luz de estas consideraciones de carácter general, es necesario analizar los siguientes casos particulares, especialmente los casos del año 1992:

**Tabla 2:** Episodios con caudales puntas más importantes antes y después del incendio con referencia a las lluvias recogidas las horas antes de la punta.

ANTES DEL INCENDIO

FECHA	CAUDAL PUNTA (m <sup>3</sup> /s)	PRECIPITACIÓN ACUMULADA 1 HORA ANTES DEL PICO (mm)	PRECIPITACIÓN ACUMULADA 2 HORAS ANTES DEL PICO (mm)	PRECIPITACIÓN ACUMULADA 12 HORAS ANTES DEL PICO (mm)
13-09-68	15.6	89.1	119.2	148.3
25-17-72	3.4	9.8	19.4	79.6
01-10-73	9.9	37.6	51.4	116.7
15-04-76	4.5	16.4	27.7	98.5
25-10-79	3.7	11.1	19.5	71.1
10-10-87	6.8	28.2	62.3	87.9

DESPUÉS DEL INCENDIO

FECHA	CAUDAL PUNTA (m <sup>3</sup> /s)	PRECIPITACIÓN ACUMULADA 1 HORA ANTES DEL PICO (mm)	PRECIPITACIÓN ACUMULADA 2 HORAS ANTES DEL PICO (mm)	PRECIPITACIÓN ACUMULADA 12 HORAS ANTES DEL PICO (mm)
01-10-90	1.92	16.9	17.0	17.8
03-10-90	5.6	15.1	20.1	20.2
23-11-90	5.5	17.8	31.1	37.4
08-12-90	7.8	23.8	30.1	66.1
05-10-91	3.6	16.2	16.5	33.7
27-09-92	7.9	64.6	66.2	68.5
30-10-92	4.3	2.2	17.6	85.4

1) Episodio del 1/10/90: se trata del primer episodio de lluvias tras el incendio, cuando el caudal aún no ha alcanzado el carácter de permanente (en 1990 lo alcanza el 12/10). En consecuencia el estado especialmente seco de la cuenca tras el verano (traducido por la ausencia de caudal en el lecho) debe reducir la magnitud de la respuesta de este primer episodio.

De todas maneras unas lluvias que se pueden considerar cómo débiles (17 mm en la hora precedente al pico, y poco más en las 24 h anteriores) son suficientes para generar un pico de 1.3 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> Km<sup>-1</sup>, respuesta inviable antes del incendio, como queda reflejado en la figura. Finalmente comentar que el episodio de 30/10/92 registra una lluvia similar

(ver Tabla 2) pero produciendo un pico de 3.8 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> Km<sup>-1</sup>. La diferencia de comportamiento es consecuencia de la inmediatez de los dos episodios, y del hecho de que el primero preparó el terreno modificando el estado hidrológico previo y potenciando una respuesta de mucha más magnitud en el segundo.

2) El episodio de 21/6/92 marca el inicio del aparente proceso de acercamiento al comportamiento anterior al incendio. Sin embargo se ha de destacar que se trata de un episodio del mes de Junio, algo totalmente fuera de lo común en la cuenca (de hecho es el único episodio registrado en esa época en los 27 años estudiados). Si comparásemos tan sólo episodios de ese mes (en los que los caudales permanentes están a

punto de desaparecer y en los que las lluvias rara vez dan lugar a una crecida), o incluso de la primavera, veríamos que el punto refleja una situación aún anómala para las características de la cuenca.

- 3) El episodio de 27/9/92 parece no seguir la tónica sugerida. Sin embargo esto es debido a que la lluvia en este episodio se registró casi en su práctica totalidad en la hora precedente a la punta (ver Tabla 2). Por lo tanto la Figura 4, en la que se utiliza la  $P_{24}$  como variable de referencia le confiere una posición anormal que no es representativa del episodio, al no ser ésta una variable significativa en este caso. Análisis posteriores (ver Figura 6) revelan que para este episodio el comportamiento de la cuenca parece no alejarse mucho del anterior al incendio.
- 4) El episodio de 30/10/92, rozando ya la normalidad según la Figura 4, no es en el fondo tan normal. Se trata de un episodio en el que la lluvia anterior ha preparado la cuenca previamente ( $P_{24}$  alta), pero la punta está generada por lluvias poco relevantes (1h y 2h antes), sobre todo si se compara con las lluvias que engendraron el episodio de 15/04/76 (ver Tabla 2) de caudal punta similar.

Estas consideraciones parecen abonar la idea de que, a pesar de poderse identificar una cierta tendencia a la relajación del efecto producido con el tiempo, en verdad la cuenca aún no ha alcanzado la normalidad en el tercer año posterior al incendio. Se necesitará analizar cuidadosamente la evolución de los próximos años antes de poder estimar el tiempo requerido para la recuperación total de la respuesta hidrológica inicial de la cuenca, que en todo caso va más allá de los tres años.

**Estudio del régimen de avenidas**

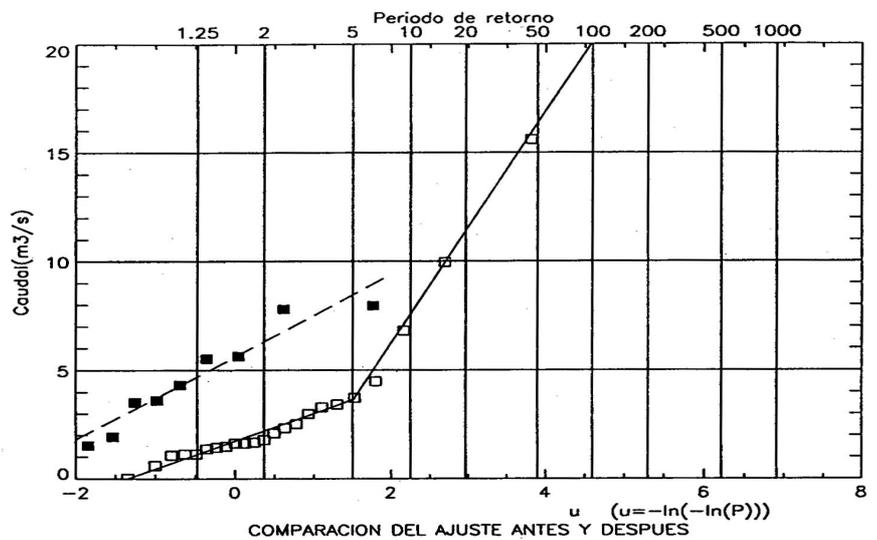
Para cuantificar el cambio producido en el régimen de avenidas se puede calcular la variación inducida en el

cálculo del periodo de retorno de los caudales punta antes y después del incendio.

La Figura 5 muestra el ajuste de ambas poblaciones. Para el periodo anterior al incendio se ha utilizado un análisis de máximos anuales sobre los 23 años hidrológicos disponibles (1967-1989). El cálculo de las probabilidades empíricas se ha realizado utilizando la fórmula de Hazen

**Tabla 3:** Valores del caudal punta para diversos periodos de retorno (T) antes del incendio

Periodo de retorno (años)	5	10	20	30
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	3.5	7	11	13.5

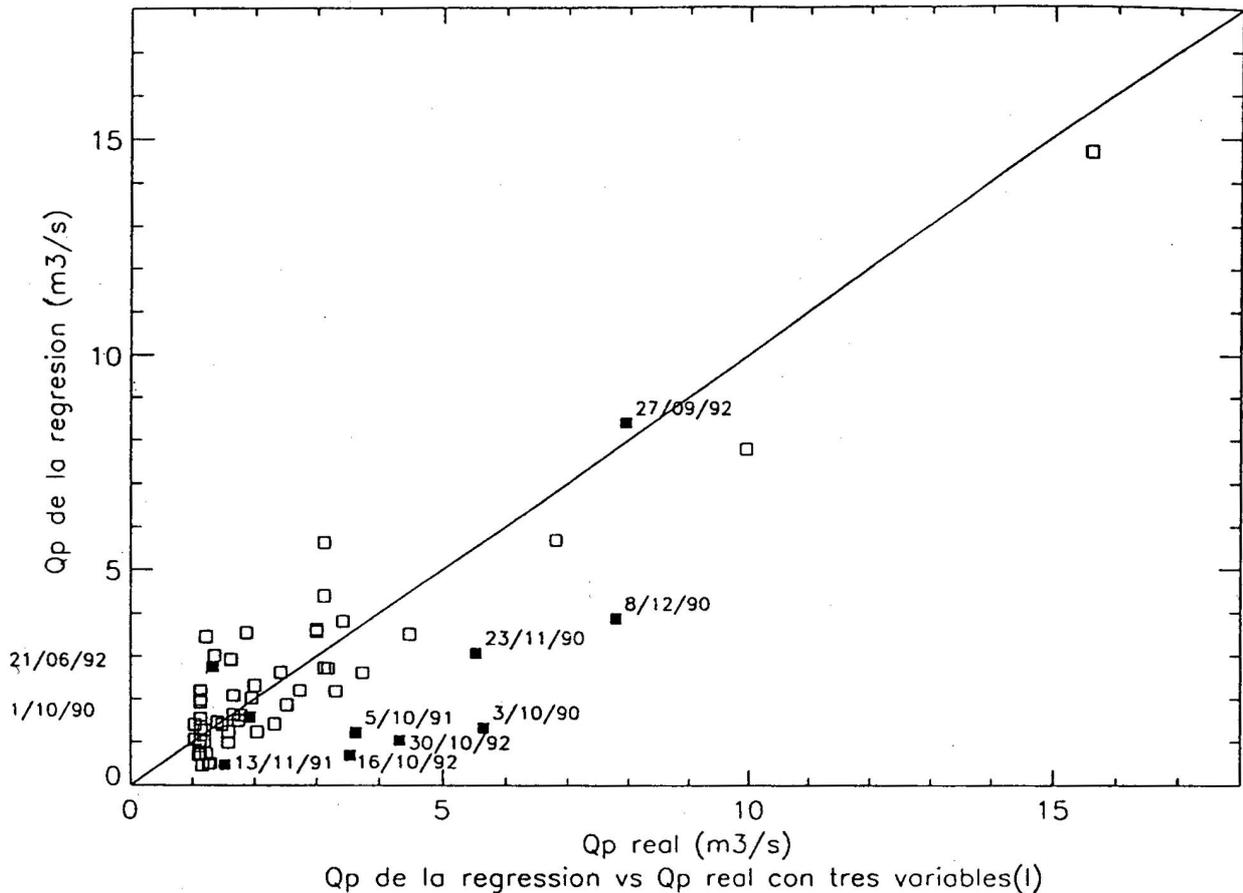


**Figura 5:** Presentación sobre papel Gumbel de los caudales punta y del ajuste de la distribución de probabilidad correspondiente por el método de los momentos: a) Antes del incendio (□, —) b) Después del incendio (■, —).

(N = número de años, i= rango del valor observado ordenado de mayor a menor)

$$P(X \geq x_i) = \frac{i-0.5}{N} \tag{1}$$

En este caso un ajuste simple de Gumbel (una recta en papel Gumbel), parece no ser adecuado a simple vista. La realización del test de bondad de ajuste  $\chi^2$  confirma esta impresión y permite rechazar el ajuste con un nivel de significancia del 5%.



**Figura 6:** Regresión lineal ajustada utilizando los episodios anteriores al incendio (□). Los posteriores se han superpuesto para su verificación (■).

Dado que nuestro objetivo no es el discutir en detalle los métodos de ajuste de extremos, nos hemos conformado con aplicar una doble Gumbel a la muestra. Otras opciones más elegantes hubieran podido ser la utilización de una *Two Components Extreme Value* (TCEV o Gumbel de 4 parámetros) que esencialmente permite eliminar la discontinuidad entre las dos ramas, o una ley de Jenkinson (o ley de valores extremos generalizada, GEV). Cabe destacar que la pendiente de la segunda Gumbel es coherente con la aplicación del método del GRADEX a la cuenca (Lavabre et al. (1994)). El ajuste propuesto es aceptable según el test  $c^2$  al 5% de significancia, y a partir de ahora será el utilizado para establecer los periodos de retorno de los caudales anteriores al incendio (ver Tabla 3).

Para el análisis de los periodos de retomo posteriores al incendio, y debido al reducido número de años de datos disponibles (3 años hidrológicos), hemos optado por un análisis en series de duración parcial. Para ello se han tomado los valores de caudal punta superiores a  $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (10 valores, de los cuales sólo 9 aparecen en la gráfica al tener uno un valor de la variable de Gumbel inferior a -2). Para poder comparar dicho análisis con el anterior al

incendio se ha utilizado una corrección de las probabilidades empíricas calculadas para poder convertir los intervalos de los periodos de retorno en años (si no, el periodo de retorno vendría dado en intervalos inferiores a un año).

En el Anexo 1 se explica el método empleado y se incluye la comparación entre los análisis de máximos anuales y de duración parcial corregida utilizado. En este caso una simple Gumbel es suficientemente aceptable según el test de  $c^2$  al 5%.

La comparación de ambos ajustes (Figura 5) permite la proposición de unas primeras ideas sobre la influencia del incendio en el régimen de avenidas. Evidentemente se podría argumentar que 3 años hidrológicos después del incendio no son suficientes para un análisis de ese tipo Sin embargo, la evolución en el tiempo del comportamiento de la cuenca detectada en el apartado anterior imposibilita que dicho análisis pueda llegar a hacerse con un número mucho más grande de años (a lo sumo un par más). Por ello este análisis no podrá ir mucho más allá en lo que a robustez se refiere. No obstante, tal y como muestra la Figura 10, la coherencia

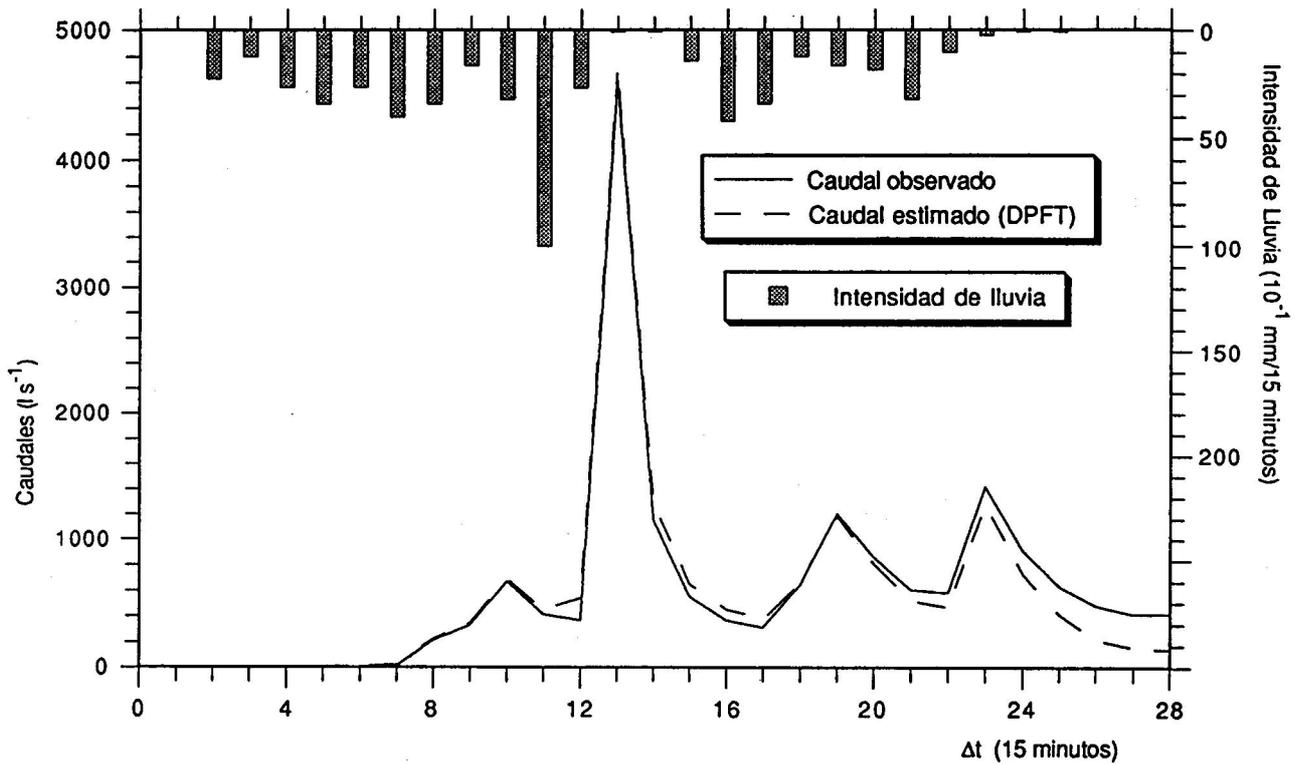


Figura 7: Crecida del día 23/11/90 observada (—) y reconstituida (-----) por la DPFT

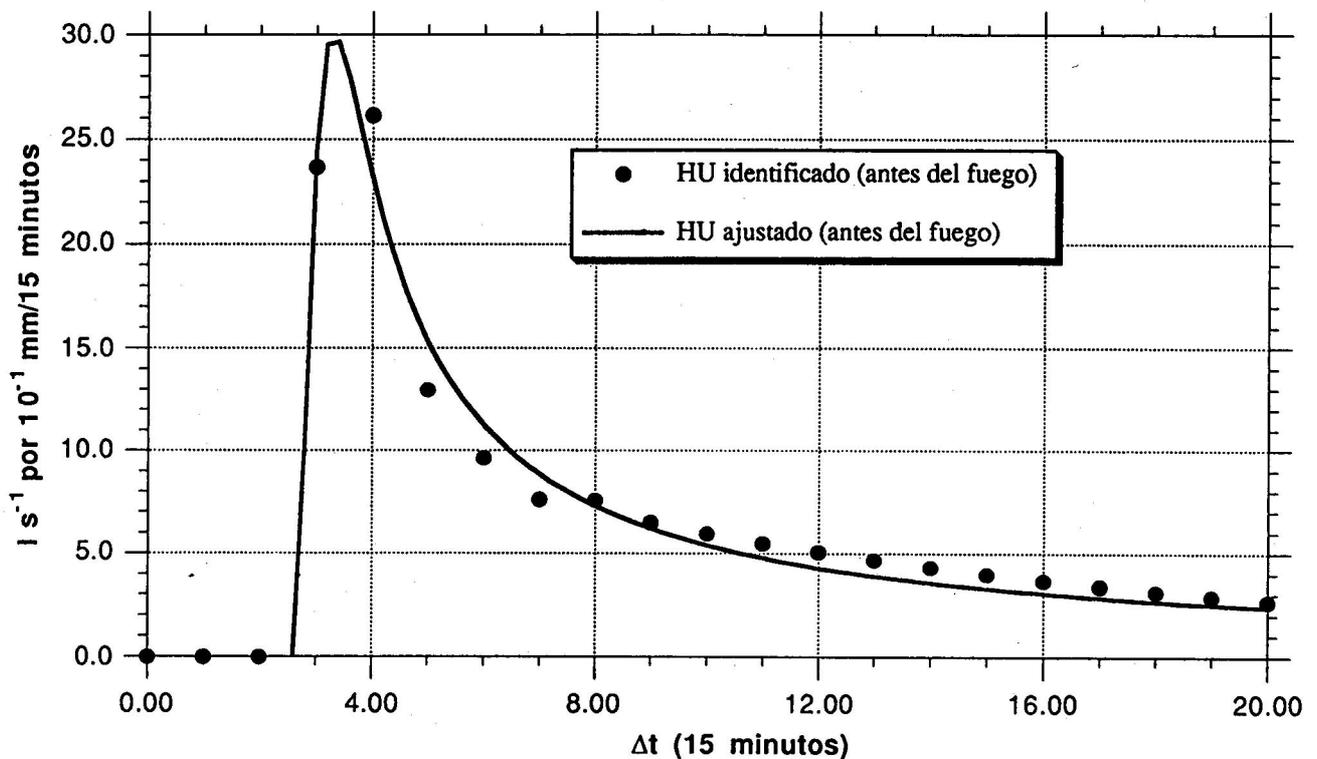


Figura 8: Hidrograma Unitario identificado, y forma analítica ajustada, utilizando los 21 episodios seleccionados de antes del incendio.

entre utilizar 3 y 10 puntos permite abrigar un nivel de confianza aceptable. Aceptando todo esto podemos proponer que:

- 1) Para periodos de retorno bajos ( $T < 10$  años) el fuego modifica sustancialmente el régimen de los caudales punta. La comparación de los dos análisis permite evidenciar que:
  - El caudal de periodo de retorno de 2 años se triplica (de 2 a  $6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ).
  - El caudal de periodo de retorno de 5 años pasa a ser de algo más del doble (de  $3.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  a  $8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ). El antiguo valor pasa a tener una frecuencia anual.
  - El caudal de periodo de retorno de 10 años ( $7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) pasa a estar asociado a un periodo de retorno de unos dos años.
- 2) Para periodos de retorno mayores ( $T > 10$  años), parece que dicha influencia se reduce de forma importante.

Esto permite proponer que el impacto del incendio se explicita de forma clara para los caudales controlados por las condiciones iniciales de la cuenca y por su capacidad de retención (afectada enormemente por el incendio); en tanto que para  $T$  grandes (50, 100, etc.) los caudales están controlados por la generación de lluvias extremas (frecuencias determinadas por las frecuencias de las propias lluvias), que no se ven alteradas por los incendios.

### Cuantificación de los efectos a través de un modelo de regresión

El objetivo de esta parte del trabajo ha sido buscar una relación lineal entre los caudales punta medidos en la estación de aforos y un total de 26 variables entre las que podemos destacar: la precipitación total caída en el episodio de lluvia; la precipitación acumulada desde el inicio del episodio lluvioso hasta el momento de producirse el caudal punta; la lluvia acumulada registrada media hora antes, una, dos, tres, ..., 72 horas antes de producirse el caudal punta; la intensidad de lluvia máxima del episodio para diferentes duraciones (media, una, dos, tres, ..., 48 horas) independientemente de cuando se ha producido en el episodio; el caudal circulante en el momento de inicio de la lluvia y el tiempo pasado desde el último episodio de lluvia. Con el fin de no limitar el estudio a una regresión lineal, se ha contemplado también que la relación fuese en forma de producto de las variables (a través de una transformación logarítmica), pero los resultados obtenidos en estos ajustes indican que la relación del caudal punta con las variables antes del incendio es preferentemente lineal. Por ello ha sido retenida dicha relación. Para obtenerla hemos utilizado

una subrutina estadística (IMSL) que elige paso a paso de entre todas las variables posibles la más significativas en función de su coeficiente de correlación parcial (regresión lineal stepwise). Esto permite reducir al máximo los problemas inducidos por la correlación cruzada de las variables explicativas, y en general permite obtener en casos como el tratado resultados equivalentes a la del Análisis en Componentes Principales, o al Análisis Factorial. Aplicando esta metodología a los datos anteriores al incendio (un total de 52 episodios con caudales puntas de más de  $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) se obtiene que, utilizando tres variables significativas, el valor de  $R^2$  para la regresión lineal es de 85.9% ( $R^2$  mide el tanto por ciento de la varianza de las observaciones explicada por el modelo lineal). La relación obtenida es la siguiente (el orden utilizado refleja el peso de los coeficientes de correlación parcial):

$$Q_p = 0.07 P_2 + 0.014 I_{48} + 0.135 P_{1/2} - 1.9 \quad (2)$$

$Q_p$ : Caudal punta ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ).

$P_2$ : Precipitación total caída durante las dos horas anteriores a la punta de caudal (mm).

$I_{48}$ : Precipitación máxima en 48 horas en cualquier instante del episodio (mm).

$P_{1/2}$ : Precipitación total caída durante la media hora anterior a la punta de caudal (mm).

La Figura 6 muestra el resultado de dicha regresión. Se puede apreciar que dicho ajuste no explica más que groseramente los puntos de  $Q_p$  bajos ( $< 3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ), que son los más afectados por los efectos ligados a las condiciones iniciales (forzosamente no lineales). Sin embargo para  $Q_p$  fuertes el ajuste permite una representación aceptable, a pesar de introducir un ligero sesgo sistemático de subestimación. Es interesante destacar que la variable más significativa resulta ser  $P_2$ . Esto significa que la lluvia registrada durante las dos horas precedentes al pico es esencialmente la responsable de la magnitud de la punta. Las correcciones introducidas por  $I_{48}$  y  $P_{1/2}$  pueden entenderse como índices relacionados con el grado de preparación de la cuenca (en general  $I_{48}$  es muy cercana a la lluvia total anterior al  $Q_p$ ) y con el grado de violencia de la lluvia inmediatamente anterior al caudal punta.

La superposición sobre la misma Figura 6 de los  $Q_p$  observados después del incendio permite constatar que la regresión estima sistemáticamente valores inferiores a los observados (a excepción del episodio del 21/6/92, ya comentado precedentemente, los valores observados son en media un 280% superiores a los estimados). Es decir los  $Q_p$  pueden ser considerados casi tres veces superiores a los que se podrían haber observado sin el incendio.

Un caso particular lo constituye el punto del episodio del 27/9/92. En este caso la regresión permite una reproducción casi perfecta del  $Q_p$  observado. Este hecho

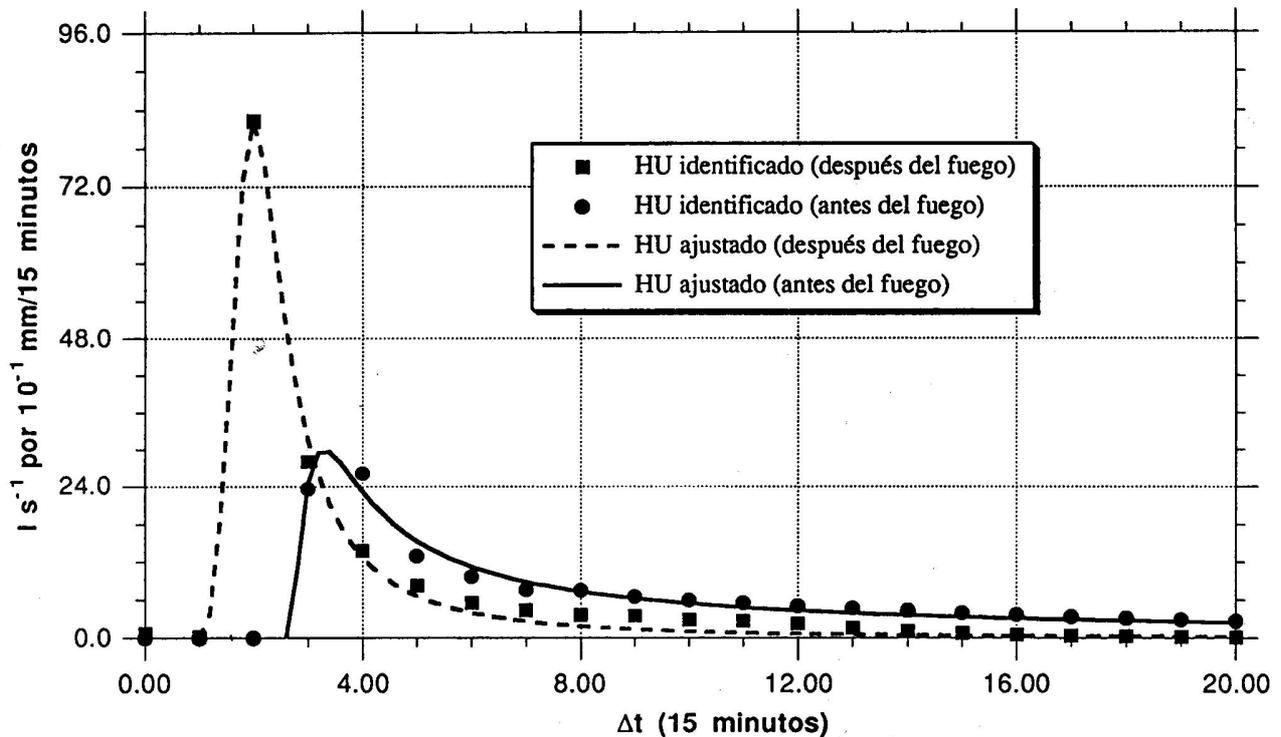


Figura 9: Comparación de los Hidrogramas Unitarios anterior y posterior al incendio (ordenadas identificadas por la DPFT y forma analítica ajustada). En el caso de después del incendio se han utilizado 11 episodios de más de  $1\ m^3\ s^{-1}$ .

permite reforzar la idea de que este episodio indica una recuperación del comportamiento hidrológico de la cuenca, comportamiento que es extremo especialmente para los episodios del otoño que sigue al incendio (3/10/90, 23/11/90, 8/12/90).

Paralelamente se ha buscado una regresión para los datos de después del incendio (un total de 10 episodios). Esta vez el ajuste no ha sido tan bueno (un valor de  $R^2$  igual a 67%), sin embargo una cosa llama bastante la atención: en la regresión lineal las nuevas variables escogidas son las mismas que antes del incendio pero referidas a periodos de tiempo significativamente inferiores. El P2 pasa a ser P1 y I48 a I24, de lo que se puede deducir que los tiempos característicos de la respuesta hidrológica se han reducido. Una segunda constatación es que en este caso una relación lineal no parece justificada a la vista de los resultados, pudiéndose concluir que el incendio altera la respuesta hidrológica induciendo una fuerte no-linealidad en la generación del  $Q_p$ .

### EFFECTOS DEL INCENDIO EN EL HIDROGRAMA UNITARIO (FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA HIDROLÓGICO)

Para el análisis cuantitativo de la alteración de la respuesta hidrológica por un incendio, hemos optado por utilizar el esquema de modelización del hidrograma unitario. Este esquema, bien conocido y ampliamente utilizado en hidrología, propone que la transformación lluvia-escorrentía se puede dividir en dos etapas

- 1) Obtención del volumen de lluvia efectivo para la generación de la escorrentía de la crecida, llamado lluvia efectiva,  $PE(t)$ , utilizando una función de pérdidas (transformación no lineal).
- 2) La distribución en el tiempo de ese volumen para obtener el hidrograma de caudales a través de la Función de Transferencia de la cuenca,  $H(t)$

(transformación lineal), generalmente llamada Hidrograma Unitario.

Para comparar los efectos del incendio sobre la respuesta hidrológica se tendría que abordar las modificaciones inducidas en las dos funciones: la función de pérdidas y la función de transferencia. Sin embargo, en un primer momento tan sólo hemos abordado las modificaciones en el Hidrograma Unitario. Esencialmente esto es debido a que si bien las modificaciones al pasar de una cuenca forestada a una quemada pueden ser estimadas en los procedimientos clásicos de diseño hidrológico (por ejemplo a través de una modificación del umbral de escorrentía o del número de curva), la modificación del Hidrograma Unitario debida a los incendios no ha sido hasta ahora abordada en estudios previos.

La metodología utilizada ha sido la del método de la DPFT (acrónimo de Diferencia Primera de la Función de Transferencia), propuesto por *Electricité de France* en 1980 (Guillot y Duband (1980); Guillot y Duband (1981)), basado en el algoritmo propuesto por Newton y Vinyard (1967). Desde ese trabajo se sabe que, independientemente del método de resolución del sistema de ecuaciones derivado del producto de convolución  $Q(t) = PE(t) * H(t)$ , la única manera robusta de identificar la función de transferencia  $H(t)$  de una cuenca es la utilización simultánea de múltiples episodios (a diferencia de las metodologías más antiguas de identificación a partir de un sólo episodio). Eso unido a la mejora del algoritmo iterativo y alternado permite a la DPFT una identificación robusta de la función de transferencia, o Hidrograma Unitario, de la cuenca sin necesidad de realizar ninguna hipótesis sobre las lluvias efectivas (resolución del problema inverso por iteraciones sucesivas de convolución/deconvolución hasta obtener la convergencia a partir de los caudales). Para una descripción completa del método ver Duband et al. (1993); Rodríguez et al. (1991); Sempere Torres (1993); Sempere Torres et al. (1992); Sempere Torres (1990) y Rodríguez (1989).

Para su aplicación a la cuenca del Rimbaud se seleccionaron 21 episodios de crecidas anteriores al incendio (1967/68-1989/90) correspondientes a los caudales punta más importantes, y los 11 episodios posteriores al incendio (1990/91-1992/93, se ha desdoblado uno que contenía dos subepisodios diferenciados), discretizados con un intervalo de tiempo  $\Delta t = 15$  minutos. El Hidrograma Unitario para el periodo anterior al incendio permite reconstituir el conjunto de las crecidas estudiadas con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.97$ , y el obtenido para el periodo posterior con un  $R^2 = 0.94$ . Un ejemplo de la reconstitución es presentado en la Figura 7.

Los hidrogramas unitarios identificados (el método estima los valores de las ordenadas) han sido posteriormente ajustados por la expresión analítica

$$H(t) = 2 H_p \frac{\left(\frac{t-t_0}{t_p}\right)^\alpha}{\left(\frac{t-t_0}{t_p}\right)^{2\alpha}}, t \geq t_0 \quad (3)$$

- $H_p$  es el caudal punta del hidrograma unitario.
- $t_0$  es el tiempo de inicio del hidrograma unitario.
- $t_p$  es el tiempo al pico del hidrograma unitario (contado desde el inicio del hidrograma unitario  $t_0$ ).
- $a$  es el parámetro de forma (fijado al imponer que el área sea unitaria).

Esta forma analítica es más conveniente que las simples ordenadas para poder comparar los resultados antes y después del incendio. Tiene la ventaja de venir determinada por el pico del Hidrograma Unitario ( $H_p, t_p$ ) y permite considerar casos en los que haya un cierto retraso inicial en la respuesta (para  $t < t_0, H(t) = 0$ ). Es interesante por su simplicidad y es la forma en la que se basa el método de predeterminación de caudales de referencia SOCÓSE, utilizado en Francia. Diversos estudios del CEMAGREF han contrastado su buena adaptación al caso de cuencas mediterráneas de funciones de transferencia de un solo pico, que suelen llevar caudal (que no se queden sistemáticamente secas al acabar las lluvias). Tiene también la particularidad de ser fácilmente integrable y de parecerse mucho al Hidrograma Unitario adimensional del *Soil Conservation Service* y a una función gamma (difiere esencialmente a partir del punto de inflexión de la rama descendente), y de ser mucho más adecuado que un hidrograma triangular.

En el caso del Hidrograma Unitario antes del incendio (ver Figura 8), se observa que la respuesta de la cuenca se inicia tras algo más de dos pasos de tiempo (unos 40 minutos) después del inicio de la lluvia y el pico se produce unos quince minutos más tarde alcanzando un valor de 30 unidades ( $1 \text{ s}^{-1} 10^{-1} \text{ mm} / 15 \text{ minutos}$ ; es decir caudal en  $1 \text{ s}^{-1}$  generados por una lluvia de 0.1 mm en 15 minutos). La rama de recesión es mucho más suave que el ascenso y se alarga durante unas 5 horas. Se aprecia también un punto de inflexión hacia las dos horas desde el inicio de la lluvia, que correspondería al tiempo de referencia obtenido en la regresión múltiple. Sin embargo la influencia de la lluvia se extiende más allá (como en el caso del hidrograma adimensional propuesto por el SCS).

En la Figura 9 se presentan simultáneamente el Hidrograma Unitario anterior al incendio y el posterior. Comparando ambos hidrogramas se puede concluir que:

- a) Hay un aumento muy importante del caudal de punta del Hidrograma Unitario que pasa de 30 unidades a más de 82. Este efecto se acompaña de una reducción importante en la rama de recesión.
- b) La punta del Hidrograma Unitario se acelera y se presenta en media hora desde el inicio de la lluvia (pasa de 50 a 30 minutos). También el inicio de la respuesta ( $t_0$ ) se acelera: pasa de 40 a 15 minutos.
- c) La forma del hidrograma pasa a ser prácticamente impulsional (la respuesta total se produce prácticamente entre dos horas y dos horas y media).
- d) La inflexión es menos marcada y se produce antes (hacia 1h después del inicio de la lluvia, tal y como hacían suponer los resultados de la regresión múltiple de los caudales punta).

Estas observaciones se pueden resumir en la constatación de una reducción de los tiempos característicos de la respuesta de la cuenca y en un aumento muy importante de la punta del hidrograma, que casi se triplica.

El efecto de la pérdida de la cobertura vegetal causado por el fuego, y por lo tanto de la capacidad de retención del terreno, se pone así claramente de manifiesto. Este resultado permite cuantificar la aceleración del proceso de generación y propagación de la escorrentía, que después del incendio alcanza a gran velocidad los ejes drenantes reduciendo el tiempo de respuesta y aumentando los caudales punta. Esa misma pérdida de la capacidad de retención puede explicar el aumento de los aportes y la reducción de los caudales de recesión.

## CONCLUSIONES

La alteración del terreno y la destrucción de la vegetación debida a los incendios provoca unos cambios importantes en las características hidrológicas de las cuencas afectadas. Gracias a la disponibilidad de una serie de datos hidrológicos de antes (1967/68 - 1989/90) y después del incendio (1990/91 - 1992/93) el estudio de la cuenca del Rimbaud, en la región mediterránea francesa, permite poner de manifiesto que:

- 1) El volumen total de agua escurrida, a nivel anual y mensual, aumenta entre un 25% y un 30% el año posterior al incendio con respecto al que se hubiese producido de no mediar el efecto del fuego.

- 2) Respecto de los caudales punta, los valores medidos en los tres años hidrológicos posteriores al incendio son en media un 280% mayores de los esperados según las estimaciones obtenidas por un modelo de regresión ajustado a partir de los episodios anteriores al incendio.
- 3) La frecuencia con la que se producen avenidas importantes aumenta considerablemente. El caudal correspondiente antes del incendio al periodo de retorno de 10 años pasa a estar asociado después a un periodo de retorno de 5 años, y el caudal de periodo de retorno de 5 años pasa a tener un frecuencia anual. Para periodos de retorno superiores a 10 años, y a la vista de los datos tratados, aparentemente el incendio parece no tener influencia.
- 4) Con respecto al Hidrograma Unitario, los cambios fundamentales son una reducción considerable de los tiempos característicos (la respuesta es mucho más rápida, la punta del Hidrograma Unitario se produce antes y la curva de recesión es mucho más corta) y un aumento muy importante del caudal punta, que casi se triplica.

Con todas las salvedades que deben hacerse dada la particularidad del estudio (cuenca mediterránea, de pequeñas dimensiones, casi totalmente calcinada por un fuego de gran intensidad, y con datos analizados de tan sólo 3 años hidrológicos posteriores al incendio), los resultados obtenidos permiten cuantificar la magnitud de la incidencia hidrológica del fuego e identificar sus principales consecuencias.

La relevancia de dichas consecuencias es especialmente importante en toda la región mediterránea, región en la que la climatología propicia tanto los episodios de lluvias intensas e inundaciones como los incendios forestales. En este marco entendemos que en España urge un apoyo institucional claro y decidido tanto para apoyar la investigación hidrológica como para garantizar la existencia de cuencas experimentales de calidad, suficientemente dotadas, que son en definitiva la base para poder mejorar el conocimiento de los procesos hidrológicos y para desarrollar nuestra capacidad de anticipar y dar pautas de actuación para prevenir la incidencia de los desastres naturales.

## ANEXO

En el caso de disponer de pocos años de datos, o en el caso de estar interesados por periodos de retorno pequeños, una alternativa interesante al análisis clásico de series de máximos anuales es utilizar un análisis de series

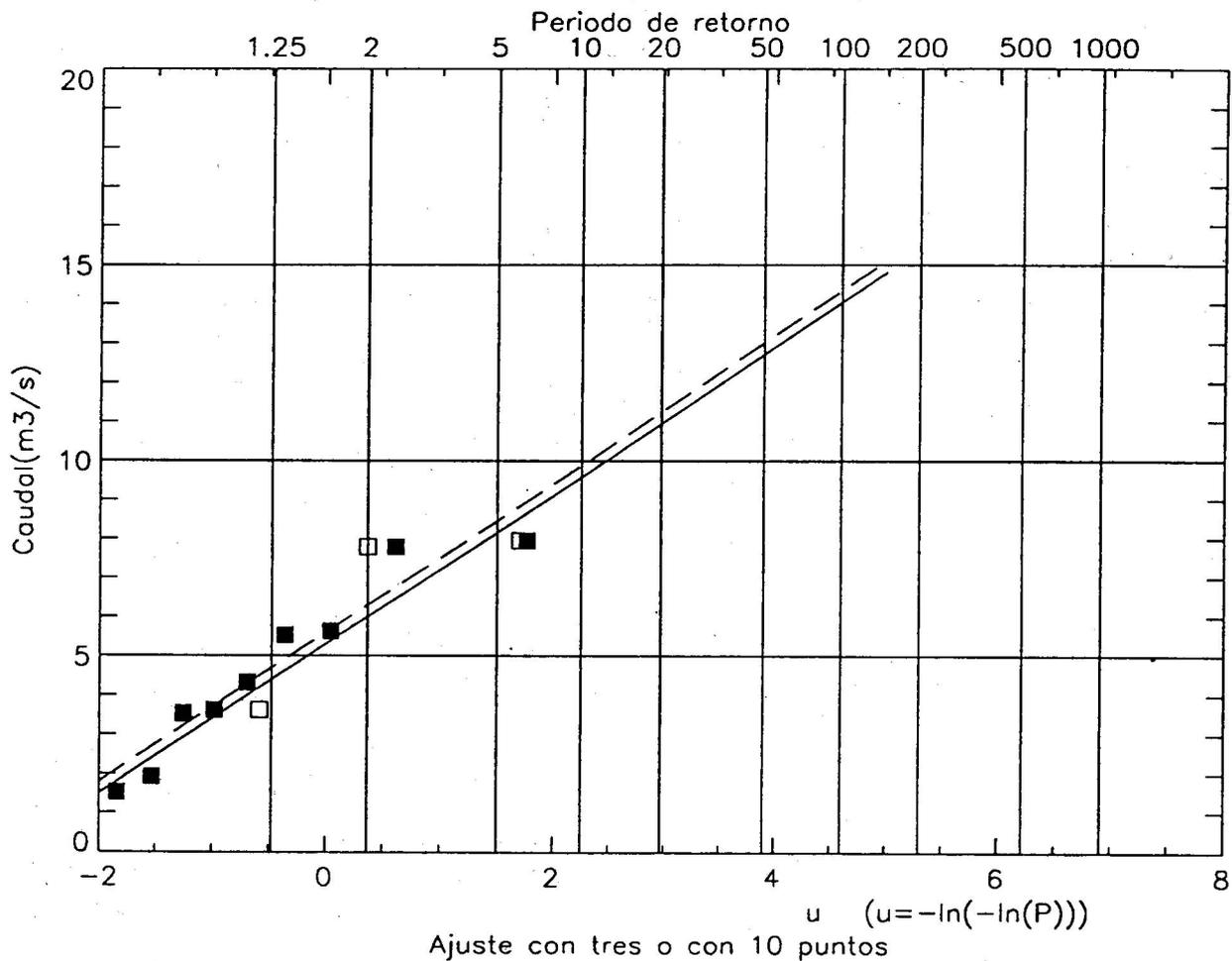


Figura 10: Comparación del análisis de máximos anuales (□, —) y de series de duración parcial de umbral  $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (■, ----).

de duración parcial.

El principio del método consiste en utilizar todos los valores, en nuestro caso de caudal punta, que superen un cierto umbral y que puedan ser considerados como realizaciones independientes (no dos puntas del mismo episodio). En general dicho análisis lleva a trabajar K valores, siendo K superior al número de años N de los cuales tenemos datos. El ajuste de una distribución dada se suele hacer como de costumbre, bien por el método de los momentos, bien por el de máxima verosimilitud, pero en cambio el análisis de frecuencias no se puede interpretar directamente. En efecto al utilizar K valores, los periodos de retorno vendrán dados en las unidades de tiempo definido por el intervalo promedio entre sucesos (N/K años), lo que resulta incómodo e imposibilita

dibujarlo directamente en papel Gumbel.

Usualmente se utiliza una corrección consistente en calcular las probabilidades de excedencia corregidas ( $P^i$ ) como:

$$P^i(X \geq x_i) = (P(X \geq x_i))^{K/N} \quad (4)$$

donde P son las probabilidades obtenidas directamente del análisis de series de duración parcial (K valores). De esta manera las parejas caudal-probabilidad corregidas pueden dibujarse en papel Gumbel con el significado usual (T en años) y ser comparadas con los resultados obtenidos por un análisis de máximos anuales.

En la Figura 10 se han representado los dos ajustes para nuestro caso: el de máximos anuales (3 puntos) y el de series de duración parcial de umbral  $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (diez puntos, aunque en la figura sólo aparezcan nueve debido a que al décimo le corresponde un valor de la variable  $u$  corregida inferior a -2). Como puede apreciarse ambos ajustes son prácticamente idénticos. La pendiente de la recta de la Ley de Gumbel ajustada es la misma (el parámetro esencial), y tan sólo varía ligeramente la ordenada en el origen, un poco mayor en el análisis de series de duración parcial. En el estudio de comparación de frecuencias se ha utilizado este análisis para el periodo posterior al incendio, al involucrar un mayor número de puntos y permitir una mayor robustez. La similitud de los resultados obtenidos por ambos métodos permite abrigar un nivel de confianza aceptable, a pesar del reducido número de años disponible.

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto AMB92-0638 de la CICYT, y ha podido llevarse a cabo gracias a la concesión de un contrato de Investigador altamente cualificado de la Generalitat de Catalunya y de una ayuda de Investigación Postdoctoral de la Fundación Caja de Madrid al primer autor. Los datos utilizados han sido cedidos por la *División d'Ouvrages Hydrauliques* del CEMAGREF de *Aix en Provence* (Francia) y para la identificación del Hidrograma Unitario se ha utilizado el programa ©DPFT cedido por la DTG de *Electricité de France*.

### REFERENCIAS

- Anderson, H. W., (1949): *Does burning increase surface runoff?* J. For., 47: 54-57.
- Anderson, H. W., Hoover, M. D. y Reinhart, K. G., (1976): *Forests and water: effects of forest management on floods, sedimentation and water supply.* Informe del USDA For. Ser., PSW-18. Berkeley, CA (USA).
- Brown, J. A. H., (1972): *Hydrologic effects of a bushfire in a catchment in south-eastern New South Wales.* J. Hydrol., 15: 77-96.
- Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L. y Williams, D., (1983): *Fire effects on soil, water and air.* En: Fire in Forestry, Vol. I: Forest fire behaviour and effects. John Wiley & Sons, New York (USA), 171-202 pp.
- DeBano, L. F., (1971): *The effect of hydrophobic substances on water movement in soil during infiltration.* Soil Sci. Soc. Am. proc., 35: 340-343.
- DeBano, L. F. y Krammes, J. S., (1966): *Water repellent soils and their relation to wildfire temperatures.* Int. Assoc. Sci. Hydrol. Bull, IX Anné, 2: 14-19.
- Dolz, J., (1993): *The problem of floods in Spain.* En: Report of the US-Spanish joint workshop on Natural Hazards, Junio 1993, NSF-UPC, Barcelona.
- Duband, D., Obled, C. y Rodriguez, J. Y., (1993): *Unit hydrograph revisited: an alternate iterative approach to UH and effective precipitation identification.* J. Hydrol, 150: 115-149.
- Guillot, P. y Duband, D., (1980): *Fonction de transfert pluie-débit sur des bassins versants de l'ordre de 1000 Km<sup>2</sup>.* La Houille Blanche, 4/5: 279-290.
- Guillot, P. y Duband, D., (1981): *Une méthode de transfert pluie-débit par regression multiple.* En: Hydrological forecasting, IAHS Publ. n° 129, 177-186 pp.
- Lavabre, J., (1990): *Bassin versant représentatif et d'étude du Réal Collobrier.* Informe del GIS-Réal Collobrier, 21 pp. Aix-en-Provence (France).
- Lavabre, J., Sempere Torres, D. y Cernesson, F., (1991): *Etude du comportement hydrologique d'un petit bassin versant méditerranéen après la destruction de l'écosystème forestier par un incendie. Premières analyses.* Hydrol. Continentale, 6 (2): 121-132.
- Lavabre, J., Sempere Torres, D. y Cernesson, F., (1993): *Changes in the hydrological response of a small Mediterranean basin a year after a wildfire.* J. Hydrol., 142: 273-299.
- Lavabre, J., Wolff, M. y Cernesson, F., (1994): *Exemple d'application de la méthode du GRA DEX sur un petit bassin versant méditerranéen.* Informe del Comité Français des Grands Barrages, 13 pp.
- Newton, D. W. y Vinyard, J. W., (1967): *Computer-determined Unit Hydrograph from flows.* J. Hydraul. Div., ASCE, 93: 219-235.
- Rodriguez, J. Y., (1989): *Modélisation pluie-débit par la méthode DPFT. Développement de la méthode initiale et extension à des cas bi-entrées.* Tesis de Doctorado, Institut National Polytechnique de Grenoble (Francia), 250 pp.

- Rodriguez, J. Y., Obled, C. y Sempere Torres, D.,(1991): *Prévision des crues dans les petits bassins versants de montagne: prise en compte de la variabilité spatiale des pluies et des mécanismes de production par l'approche DPFT*. La Houille Blanche, 5: 341-348.
- Rowe, P. B., Countryman, C. M. y Storey, H. C., (1954): *Hydrologie analysis used to determine effects of fire on peak discharge and erosion rates in southern California watershed*. Informe del U.S. For. Serv., Unnumbered Report. 49 pp.
- Scott, D. F., (1993): *The hydrological effects of fire in South African mountain catchments*. J. Hydrol. 150: 409-432.
- Scott, D. F. y Van Wyn, D. B., (1990): *The effects of wildfire on soil wettability and hydrological behaviour of an afforested catchment*. J. Hydrol. 121: 239-256.
- Sempere Torres, D., (1990): *Calcul de la lame ruisselée dans la modélisation pluie-débit : limitations des approches globales et introduction simplifiée de la topographie et de la variabilité spatiale des pluies*. Tesis de Doctorado. Institut National Polytechnique de Grenoble (Francia). 321 pp.
- Sempere Torres, D., (1993): *Mécanismes hydrologiques à l'échelle du bassin versant*. En: L'aiguat del 40: les inondations catastrophiques et les politiques de prévention en Méditerranée nord-occidentale , (J. Bécat y G. Soutadé, Ed.),. Servei Geològic de Catalunya, Generalitat de Catalunya, Barcelona, 215-228 pp.
- Sempere Torres, D., Rodriguez, J. Y. y Obled, C.,(1992). *Using the DPFT approach to improve flash flood forecasting models*. Natural Hazards, 5: 17-41.
- Tiedemann, A. R., Conrad, C. E., Dieterich, J. H., Hornbeck, J. W., Megahan, W. F., Viereck, L. A. y Wade, D. D., (1979): *Effects of fire on water: a state of knowledge review*. Informe del USDA For. Serv., Gen. Tech. Rep. WP-10. Washington D.C. (USA).