

J. I. LÓPEZ MORENO, S. BEGUERÍA, B. VALERO GARCÉS Y J. M. GARCÍA-RUIZ
Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC. Zaragoza

Intensidad de las avenidas y aterramiento de embalses en el Pirineo Central español

RESUMEN

Se estudia la sedimentación en los embalses de Yesa (río Aragón) y Barasona (río Ésera). En ambos casos se ha registrado un claro descenso en el aporte de sedimentos desde 1970, para cuya explicación se han analizado los valores más elevados de caudal y precipitación durante el período 1959-1999, encontrándose una clara mengua en la intensidad y frecuencia de las avenidas, en tanto que la intensidad de las precipitaciones no muestra variación alguna. El abandono de los campos de cultivo y su posterior recolonización vegetal durante la segunda mitad del siglo XX puede estar modificando el comportamiento hidrológico y geomorfológico de las cuencas pirenaicas.

RÉSUMÉ

Intensité des crues et colmatation des réservoirs du Pyréné Central espagnol.- On étudie la sédimentation dans les réservoirs de Yesa (fleuve Aragón) et Barasona (fleuve Ésera), qui ont connu une diminution de l'apport de sédiment depuis 1970. Pour expliquer cette évolution on a analysé les valeurs les plus élevées du débit et des précipitations pendant la période 1959-1999. Les résultats montrent une nette diminution de l'intensité et la fréquence des crues tandis que celles des pluies ne varient pas. L'abandonnement des champs et leur recolonisation végétale pendant la deuxième partie du XX^{ème} siècle

peuvent avoir modifié la réponse hydrologique et géomorphologique des bassins pyrénéens.

ABSTRACT

Floods intensity and siltation of reservoirs in the Spanish Central Pyrenees.- This paper analyzes the siltation process in the Yesa (Aragón river) and Barasona (Ésera river) reservoirs. In both cases, a clear decrease in the sediment accumulation rate has been recorded since 1970. The evolution of the highest values of discharge and rainfall during the period 1959-1999 has been analyzed, and the results show a decrease in the intensity of floods while that of precipitation doesn't show any trend. The process of farmland abandonment and the consequent plant recolonisation during the second half of the 20th century may have modified the hydrological and geomorphological response of the Pyrenean basins.

Palabras clave / Mots clé / Key words

Embalses, sedimentación, avenidas, colonización vegetal, Pirineos Centrales.

Reservoirs, sédimentation, crues, récolonisation végétale, Pyrénées Centrales.

Reservoirs, siltation, floods, plant recolonisation, Central Pyrenees.

I INTRODUCCIÓN

Los principales ríos pirenaicos se encuentran regulados por medio de embalses que producen energía hidroeléctrica y almacenan agua para el regadío de las llanuras semiáridas de la Depresión del Ebro. Los embalses

actúan como una gran trampa de sedimentos y recogen la mayor parte del material que transportan los ríos (BRUNE, 1953; ANDREWS, 1986; VERSTRAETEN, 2000). La acumulación de sedimentos supone un descenso en la capacidad de almacenamiento de agua (SHALASH, 1982; SANZ MONTERO, SMITH, 1994; 1999; HAY, 1994; AL-TAIEE, 1990), así como daños a diferentes infraestructuras, lo

que justifica la necesidad de profundizar en el estudio de este proceso (EINSELE, 1997; MORRIS, 1997).

El aterramiento de embalses es un fenómeno complejo en el que intervienen múltiples factores, entre los que destacan:

a) La erosión que se produce aguas arriba del embalse, que varía en función de la erodibilidad del sustrato, la protección del suelo facilitada básicamente por el tipo y densidad de cubierta vegetal, y la intensidad de la lluvia. (DEARING, 1978, 1991; HARDEN, 1993; STOTT, 1987; MCINTYRE, 1994).

b) El transporte de material desde la ladera hasta los cauces fluviales, así como la toma de sedimento del propio cauce, o de las zonas más cercanas a él en el momento de producirse las avenidas. Las características morfométricas y topográficas (FOSTER, 1985) de la cuenca, las condiciones climáticas, así como la frecuencia e intensidad de las crecidas, determinan la proporción del material erosionado que llega a los cauces principales y por tanto, finalmente al propio embalse (AMBERS, 2001; WALLING, 1983).

c) La gestión del embalse resulta igualmente muy importante para explicar el ritmo de aterramiento. La altura de la lámina de agua en el momento de producirse las avenidas y la forma de laminación determinan la distribución del sedimento dentro del embalse y el tiempo de permanencia del agua cargada de material en suspensión. La adopción de medidas para reducir la sedimentación (uso de canales de desviación de crecidas, utilización de los desagües de fondo para facilitar la salida del sedimento o la extracción de parte del material depositado en el embalse) disminuye la tasa de sedimentación, en ocasiones de manera significativa (COBO RAYÁN, 1996; LABADZ, 1995; MANEUX, 2001). El tamaño del embalse en relación con la aportación hidrológica explica igualmente la proporción de sedimento retenido.

De los múltiples factores que influyen en el proceso de colmatación de un embalse, algunos como la litología se mantienen estables a lo largo del tiempo, pero la mayor parte de ellos (utilización del territorio, cubierta vegetal, condiciones hidroclimáticas y gestión del embalse) varían alterando el ritmo de llegada y acumulación de sedimento en el embalse.

En España la mayor parte de la información disponible sobre aterramiento de embalses procede de las batimetrías realizadas por el CEDEX (Centro de Estudios y Experimentaciones) y muestran unos valores de aporte de sedimento anual medio entre 150 y 1.000 t/km² lo que supone una reducción de su capacidad entre el 0,4 y

0,7% por año. El aporte de sólidos a los embalses pirenaicos muestra valores intermedios (AVENDAÑO SALAS, 1995 y 1997).

Es evidente que a lo largo del tiempo se producen cambios en las tasas de erosión y transporte de sedimento, debido a factores ambientales y humanos. Sin embargo, apenas existe información temporal sobre el ritmo de sedimentación en los embalses, pues en la mayor parte de ellos sólo existe una batimetría posterior a su construcción. Éste es un problema de gran magnitud para la gestión de embalses y la estimación de su vida útil, así como para la planificación territorial a escala de cuenca. El conocimiento de las causas que producen cambios en la tasa de sedimentación es fundamental para definir estrategias frente al problema del aterramiento y poder realizar estimaciones de las tendencias futuras para cada uno de los embalses.

En este trabajo se estudian las tendencias en la sedimentación de dos embalses de gran importancia estratégica para el aprovechamiento de los recursos hídricos del Pirineo Central español: Yesa y Barasona. El objetivo principal es relacionar esas tendencias con la evolución de las avenidas y de las precipitaciones más intensas.

II

EL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza en el Pirineo Central Español, entre los ríos Esca y Noguera Ribagorzana (Fig. 1). El relieve tiende a elevarse progresivamente de oeste a este y de norte a sur, alcanzando las máximas altitudes en las cabeceras de las cuencas de los ríos Cinca, Ésera y Noguera Ribagorzana, donde se superan ocasionalmente los 3.000 m. de altitud.

Desde un punto de vista estructural, el relieve se organiza en bandas paralelas de norte a sur, distinguiéndose, a) el Pirineo Axil, formado por diversos materiales paleozoicos (calizas, pizarras, cuarcitas) y batolitos graníticos tardihercínicos; b) las Sierras Interiores, compuestas por materiales mesozoicos (básicamente calizas y areniscas) dando lugar a un relieve muy abrupto; c) el Sector del Flysch, formado por areniscas y margas del Eoceno, alternado en estratos muy delgados e intensamente plegados; d) la Depresión Interior Altoaragonesa, modelada en margas del Eoceno, con una topografía más suave y abierta dominada por acumulaciones de terrazas y glaciares; e) las molasas prepirenaicas, al sur de las margas eocenas, formadas por areniscas, arcillas y margas, con potentes acumulaciones de conglomerados en su borde sep-

tentrional; y finalmente, f) las Sierras Exteriores compuestas por margas, calizas, areniscas y arcillas yesíferas, dando lugar a una alineación estrecha y continua que recorre el sector más meridional de la zona de estudio.

Temperaturas y precipitaciones muestran un claro gradiente norte-sur, muy matizado por las irregularidades topográficas y la mayor o menor influencia atlántica y mediterránea. Los ambientes oceánicos dominan en el sector más occidental del área de estudio, siendo progresivamente sustituidas (especialmente a partir del río Gállego) por condiciones mediterráneas o mediterráneo-continentales de carácter montano. La variedad de influencias y los elevados gradientes altitudinales que existen en el área de estudio dan lugar a importantes diferencias en cuanto a la cantidad de precipitaciones. Las áreas situadas por encima de 2.000 m s.n.m. reciben más de 2.000 mm anuales, mientras en la Depresión Interior el brusco descenso del relieve se manifiesta en valores sensiblemente más bajos: Artieda a 620 m, 717 mm; Jaca a 820 m, 873 mm; Mediano a 504 m, 864 mm. Las lluvias más intensas tienden a concentrarse entre agosto y noviembre. En total, el otoño (septiembre, octubre y noviembre) representa el 45,1% de todos los registros máximos anuales (GARCÍA RUIZ *et al.*, 2001).

Las temperaturas están básicamente controladas por el gradiente altitudinal. Por encima de los 1.000 m la temperatura media es inferior a 10 °C. A 2.000 m la temperatura se sitúa cerca de 5 °C (PUIGDEFÁBREGAS, 1976). Entre noviembre y abril la isoterma de 0 °C se localiza alrededor de 1.600 m (GARCÍA RUIZ *et al.*, 1986).

Las actividades humanas han cambiado mucho a lo largo del siglo XX. La mayor parte de los campos de cultivo se han abandonado, excepto aquellos que se encontraban mejor ubicados (en general los situados en la Depresión Interior, además de los localizados en los fondos de valle). Los campos abandonados han sido colonizados por formaciones de matorral o han sido reforestados fundamentalmente con pino (MOLINILLO *et al.*, 1997). Los bosques naturales dominan por encima de 1.400 m. El piso subalpino se desarrolla a partir de 1.800 m, y se halla compuesto por pastos y bosques de *Pinus uncinata*. Finalmente, el piso alpino comienza alrededor de los 2.300 m.

III MÉTODOS

El estudio de la sedimentación en el embalse de Yesa se ha realizado a partir de dos batimetrías realizadas

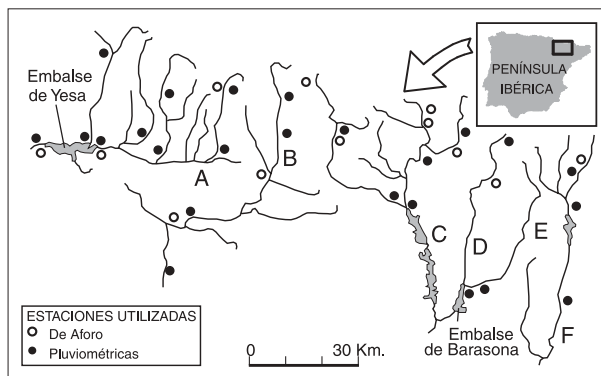


FIG. 1. Zona de estudio.

1: Estaciones de aforo utilizadas. 2: Estaciones pluviométricas utilizadas. A: Río Aragón. B: Río Gállego. C: Río Cinca. D: Río Ésera. E: Río Isábena. F: Río Noguera Ribagorzana.

por el CEDEX en 1969 y 1986, obteniéndose la contribución sólida al embalse a partir de las pérdidas de capacidad útil registradas en cada batimetría. La sedimentación en el embalse de Barasona ha sido estudiada a partir de muestras de sedimento tomadas en distintos puntos del embalse. La obtención de las correspondientes curvas de cesio 137 ha permitido distinguir tres períodos con distintos ratios de sedimentación (VALERO *et al.*, 1999).

Para detectar posibles cambios en el régimen de avenidas y precipitaciones intensas se ha aplicado el análisis de intensidad diaria, desarrollado por la *Climate Research Unit* de la Universidad de East Anglia (OSBORN, 2000). Este método se basa en la obtención de valores (cuantiles), de precipitación o caudal, que dividen una serie acumulada en diez grupos iguales. Posteriormente, se calcula el porcentaje anual del caudal o de la precipitación, formada por los valores que se encuentran entre cada uno de los cuantiles. En el caso de las precipitaciones se han promediado las estaciones mejor correlacionadas, obteniéndose así una serie regional de la aportación de los valores de precipitación más elevados a los totales anuales. Se ha optado por obtener una serie regional de precipitaciones debido a que, en el caso de la cuenca del Ésera, no existen estaciones pluviométricas de suficiente duración y calidad como para poder comparar con la evolución de las avenidas. La única estación suficientemente larga (Seira) se correlaciona muy mal con el resto, y por ello se ha desechado para éste y otros análisis similares (BEGUERÍA *et al.*, en prensa).

En el caso de las avenidas, la contribución de los valores de caudal más elevados al total anual se ha estudiado en las estaciones de aforo de la Cola del embalse

CUADRO I. Resultados de las batimetrías realizadas en el embalse de Yesa

	1959	1969	1986
Capacidad hm ³	471	457	450
Perdida de capacidad hm ³	–	14	7
Aportación anual de sedimento hm ³ /año	–	1,4	0,39
Vida estimada útil	–	353	588

de Yesa (Cuenca del río Aragón) y Graus (cuenca del río Ésera).

La evolución de los eventos de mayor intensidad de caudal y precipitación a lo largo del período de estudio también ha sido estudiada a partir de los valores esperados para un período de retorno de dos años, aplicando una ventana móvil de siete años. El período de retorno se ha estimado aplicando el Modelo General Pareto a las series de excedencia que superan el centil 97. Los parámetros del modelo se han obtenido a partir de los L momentos (HOSKING, 1990). Con la intención de no perder demasiados años de registro, la ventana móvil utilizada es de sólo 7 años. Los resultados se han calculado para un período de retorno de dos años, puesto que no sería consistente establecer predicciones para eventos de más baja frecuencia.

Una vez comprobada la distribución normal de los resultados obtenidos para cada una de las estaciones, éstas se han convertido en series de unidades de desviación estándar. Las series que mostraban correlación significativa (sólo se han eliminado la estación de aforos de Canfranc y la pluviométrica de Seira) han sido promediadas, obteniendo una serie regional de caudal y otra de precipitación para la zona de estudio.

IV RESULTADOS

1. EVOLUCIÓN DE LA SEDIMENTACIÓN DE LOS EMBALSES DE YESA Y BARASONA

Los datos disponibles sobre el proceso de aterramiento en ambos embalses muestran una acusado descenso de contribución de material sólido a partir de los años setenta. Si bien los métodos para obtener una estimación de la evolución en la llegada de material y su decantación en cada embalse son diferentes, los períodos que quedan limitados son muy similares, lo que permite su comparación.

CUADRO II. Tasas de sedimentación en el embalse de Barasona

Período	Tasa de sedimentación (cm/año)		
	Cola de embalse	Sector norte	Sector sur
1932-1960	–	–	1,5
1960-1970	15	24,6	18,2
1970-1990	10	3,7	11,6

A. El embalse de Yesa

El embalse de Yesa, en el río Aragón, comenzó a funcionar en 1959 con una capacidad inicial de 470 hm³. Su principal función es suministrar agua para el riego de 60.701 ha a través del Canal de las Bardenas. También es utilizado para la laminación de crecidas, principalmente en otoño y primavera (LÓPEZ MORENO *et al.*, 2001).

El Cuadro I muestra los resultados de las dos batimetrías llevadas a cabo por el CEDEX. La primera fue realizada en 1969 y dio una capacidad útil de 450 hm³, lo que supone para el período 1959-1969 una pérdida de volumen útil de 14 hm³, equivalente a una contribución sólida anual de 1,4 hm³ año⁻¹. Con estos datos se calculó una vida útil para el embalse de 353 años. La segunda batimetría fue realizada en 1986 y estimó una capacidad de 450 hm³, por lo que durante el período 1969-1986 se habían perdido 7 hm³ resultando una contribución anual de 0,39 hm³ año⁻¹. El acusado descenso en el aterramiento del embalse llevó a un incremento en la expectativa de vida útil hasta los 588 años.

B. El embalse de Barasona

El embalse de Barasona comenzó a funcionar en 1932, destinado a suministrar agua para el riego de 104.850 ha, a través del Canal de Aragón y Cataluña, y para la producción hidroeléctrica. Su capacidad original era de 71 hm³, siendo recrecido en 1972 hasta una capacidad de 92 hm³.

El Cuadro II muestra los períodos con distinto ratio de sedimentación, que fueron distinguidos a partir de las curvas de Cesio 137 obtenidas de diferentes muestras de sedimento extraídas del vaso del embalse (VALERO *et al.*, 1999).

Durante el primer período (1932-1960) se utilizaban las compuertas de fondo para evacuar el sedimento acumulado en las proximidades de la presa. Esto explica la existencia de una tasa de sedimentación muy baja, tan

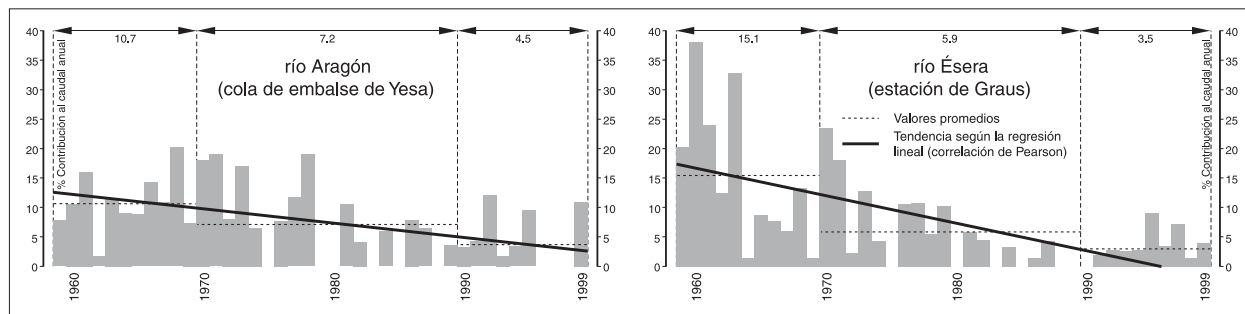


FIG. 2. Evolución del porcentaje de caudal anual formado por los valores diarios que superan el cuantil 10 (A) en el río Aragón (estación Cola de Embalse) y (B) en el río Ésera (estación de Graus).

sólo apreciable en uno de los puntos muestreados (sector sur).

La utilización de compuertas de fondo fue abandonada en 1960. El período entre 1960 y 1970 coincide con el momento en que se registran los valores de sedimentación más elevados, en cualquiera de los tres sectores muestreados, especialmente en el septentrional.

Durante el tercer período, entre 1970 y 1990, las tasas de sedimentación descienden de manera notoria, a pesar de no llevarse a cabo ningún tipo de gestión de los sedimentos del embalse. Debe tenerse en cuenta además que la duración de este período duplica la del segundo, lo cual reduce aun más el ritmo anual de sedimentación. Lamentablemente, ninguno de los muestreos efectuados en el embalse de Barasona permite estimar las tasa de sedimentación, puesto que no existe una batimetría general de todo el vaso. A pesar de ello, las cifras obteni-

das son bien elocuentes del cambio en el ritmo de llegada de sedimentos.

2. EVOLUCIÓN DE LAS AVENIDAS Y DE LAS PRECIPITACIONES MÁS INTENSAS

La Figura 2 muestra la evolución del porcentaje del caudal anual formado por los valores que se encuentran por encima del cuantil 10, tanto en la cuenca del Aragón (aforo en la cola del embalse de Yesa) como en la del Ésera (aforo en Graus, a la entrada del embalse de Barasona). A lo largo del período de estudio se observa una tendencia negativa, indicando que los valores más elevados de caudal poseen cada vez un menor peso en el conjunto de los caudales anuales. Desde 1960 se manifiestan importantes fluctuaciones en esa contribución, con valores más elevados hasta 1974, un descenso en torno a

CUADRO III. Correlaciones entre la frecuencia de crecidas y el tiempo en distintos aforos del Pirineo Central, para diferentes intensidades de crecida (Q×3, Q×5 y Q×10)

Estación de aforo	Caudal anual ×3	Caudal anual ×5	Caudal anual ×10
Aragón Subordán, Javierregay	-0,48**	-0,43*	-0,41*
Aragón, Jaca	-0,44*	-0,36*	-0,46**
Aragón, Cola de Embalse	-0,53**	-0,52**	-0,54**
Gállego, Santa Eulalia	-0,62**	-0,67**	-0,68**
Ara, Torla	-0,62**	-0,42*	-0,23
Cinqueta, Molino de Gistain	-0,59**	-0,23	-0,08
Ésera, Eriste	-0,57**	-0,68**	-0,41*
Ésera, Graus	-0,35*	-0,53**	-0,38*
Isábena, Capella	-0,47**	-0,51**	-0,62**
Noguera Ribagorzana, Pont de Suert	-0,42*	-0,37*	-0,37*
Vero, Lecina	-0,68**	-0,68**	-0,67

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

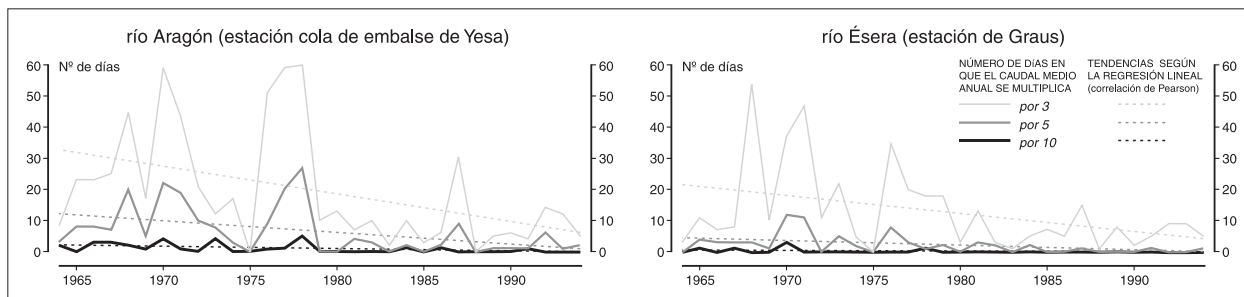


FIG. 3. Evolución de la frecuencia de las crecidas en el río Aragón (Cola de Embalse de Yesa) y en el río Ésera (Graus).

1976, un nuevo y breve incremento en 1978-80 y un descenso en las dos últimas décadas. La regresión ($r^2 = 0,22$ para el río Aragón y $r^2 = 0,37$; para el río Ésera; $p > 0,01$) muestra una fuerte pendiente que se refuerza si se analizan diferentes períodos. Las líneas de puntos indican el valor promedio de los períodos 1960-1970, 1970-1990 y 1990-2000, constituyendo aproximadamente los períodos de los que se dispone de información en los embalses analizados. Los valores medios más elevados se alcanzan durante la década 1960-1970, llegando a representar los caudales más altos el 10,7% de la descarga total en el río Aragón y el 15% en el río Ésera. En el período 1970-1990 la contribución media de los caudales más altos desciende hasta el 7,2 y el 6% respectivamente, y hasta el 4,5 y 3,5% en la década siguiente. De hecho, los años en los que los caudales más elevados representan contribuciones elevadas desaparecen a partir de 1978 en el río Aragón y a partir de 1971 en el río Ésera.

La frecuencia anual de las crecidas ha experimentado una tendencia similar, como se observa en la figura 3. Tanto en el río Aragón a la entrada en el embalse de Yesa, como en el río Ésera en Graus, muestran un marcado descenso en el número de días en los que el caudal supera en 3, 5 y 10 ($Q \times 3$, $Q \times 5$ y $Q \times 10$) veces el caudal medio anual. Todas las correlaciones con el tiempo son significativas para un nivel del 95 ó del 99%. El Cuadro III confirma además que se trata de un fenómeno generalizable a todos los ríos pirenaicos (GARCÍA RUIZ *et al.*, 2001). En todo caso, la regresión correspondiente a las crecidas $Q \times 3$ presenta una pendiente mucho más acentuada que las pertenecientes a las crecidas $Q \times 5$ y $Q \times 10$, reflejando que las primeras son las que han sufrido una reducción más acusada en su frecuencia.

La figura 4 muestra el porcentaje de precipitación anual formado por los valores que exceden el cuantil 10, cuya evolución presenta claras diferencias en comparación con las series de caudal. A lo largo del período de estudio no se aprecian variaciones en la importancia de

los eventos intensos de precipitación, no existiendo pendiente en su línea de tendencia. Los promedios de los períodos definidos presentan valores muy similares, descendiendo en el segundo período para volver a aumentar en la última década, lo que evidencia una clara ruptura entre la evolución de las lluvias intensas y la de las avenidas.

La figura 5 muestra la serie regional de los valores esperados de caudal y precipitación para un período de retorno de dos años, habiendo aplicado una ventana móvil de siete años. La evolución de ambas líneas muestra tendencias muy diferentes. Así, los valores de caudal tienden a descender de forma prácticamente constante a partir de mediados de los años 60, mientras que la precipitación no presenta tendencia en toda la serie. Es interesante destacar que durante los primeros años del período estudiado, ambas líneas mantienen una evolución prácticamente paralela. En cambio a partir de los años 80 se separan, aumentando la primera y continuando su descenso la segunda. Esta evolución significa que, al menos en el caso de las avenidas de alta frecuencia, su ocurrencia está condicionada en los últimos años por factores distintos de la precipitación.

V CONCLUSIONES

Al analizar la información existente sobre la acumulación de sedimento en dos embalses del Pirineo Central español se ha comprobado la existencia de un marcado descenso en la tasa de aterramiento desde mediados de los años setenta del siglo xx. Este trabajo ha tratado de averiguar si esa tendencia se debe a una reducción en el papel de las precipitaciones más intensas, con su consiguiente reflejo en la intensidad de las avenidas.

Se ha comprobado, en efecto, que las avenidas más intensas tienen un peso decreciente en el caudal de los

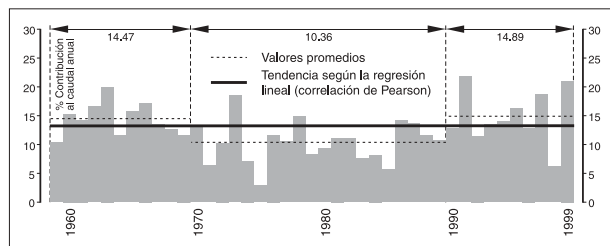


FIG. 4. Serie regional del porcentaje de la precipitación anual formada por los valores diarios que superan el cuantil 10.

ríos Aragón y Ésera. Otro tanto puede decirse cuando se analiza la evolución de la frecuencia de las crecidas. Este descenso explica, en gran medida, la menor aportación sedimentaria de los ríos Aragón y Ésera a sus respectivos embalses. Sin embargo, en contra de lo que cabría esperar, esa tendencia decreciente no está relacionada con un descenso en la intensidad de las precipitaciones. De hecho, a escala de todo el Pirineo Central las lluvias más intensas mantienen un peso similar en el total anual a lo largo del período de estudio.

Si la evolución de las precipitaciones más intensas no explica la evolución de las avenidas, es evidente que existe otro factor, también variable en el tiempo, que influye directamente en la respuesta hidrológica de las cuencas durante eventos lluviosos. Ese factor sólo puede ser un cambio en las características de la cubierta vegetal.

Es bien conocido el hecho de que las áreas de montaña han experimentado profundos cambios de uso de suelo desde mediados del siglo XX. Tales cambios están representados por un abandono generalizado de los cultivos en laderas (LASANTA, 1989; GARCÍA RUIZ & LASANTA, 1993), la expansión de diversas formaciones de matorral (MOLINILO *et al.*, 1997) y la reforestación de extensas laderas (ORTIGOSA *et al.*, 1990).

Las consecuencias de la reducción de la superficie cultivada y su sustitución por matorral y bosque han sido estudiadas por medio de parcelas experimentales en la Estación Experimental Valle de Aísa (GARCÍA RUIZ *et al.*, 1995), confirmando los resultados obtenidos por otros autores en diferentes ambientes: La reforestación implica un aumento de la intercepción (véanse por ejemplo, en ambientes mediterráneos, LLORENS *et al.*, 1997; COGNARD-PLANCQ *et al.*, 2001; GALLART *et al.*, 1997) y

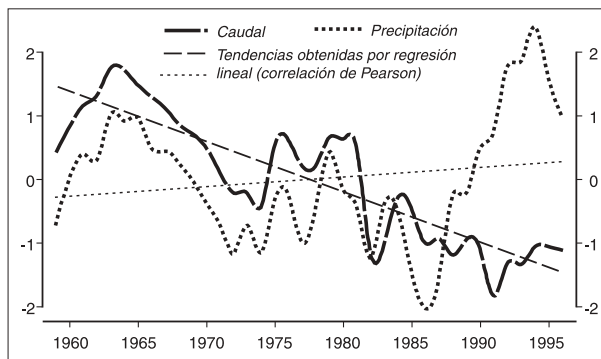


FIG. 5. Serie regional de anomalías de caudal y precipitación para un período de retorno de dos años, aplicando una ventana móvil de siete años.

una reducción en la generación de escorrentía directa o de tormenta (*stormflow*), al menos durante eventos pluviométricos de mediana y alta frecuencia. De ahí la importancia de la tendencia decreciente observada en los caudales esperables para un período de retorno de dos años. La sustitución de cultivos cerealistas en laderas pendientes, a veces bajo sistemas de cultivo nómadas (*shifting agriculture*), por matorral denso, ha dado lugar a respuestas hidrológicas más moderadas, acompañadas de un claro descenso en la producción de sedimento (GARCÍA RUIZ *et al.*, 1996; LASANTA & GARCÍA RUIZ, 1998). Recientemente, Beguería *et al.* (en prensa) han puesto en manifiesto la gran influencia de los cambios de uso de suelo y cubierta vegetal sobre el caudal de los ríos en el Pirineo Central. Menos escorrentía de tormenta y mayor densidad en la cubierta vegetal se añan para disminuir los aportes de sedimento hacia los embalses, cuyo ritmo de aterramiento se ha reducido mucho en las dos últimas décadas. Parte de ese descenso puede atribuirse también a la más que probable retención de materiales gruesos inmediatamente aguas arriba de la cola de los embalses, si bien se carece de información cuantitativa y relevante sobre la cuestión. No existe tampoco información a largo plazo de los efectos de las presas de retención de sedimentos en barrancos torrenciales del sector del flysch y en algunos afluentes importantes, si bien sus consecuencias parecen contradictorias y, en todo caso, muy locales (GARCÍA RUIZ & PUIGDEFÁBREGAS, 1985; MARTÍNEZ CASTROVIEJO *et al.*, 1990).

Este trabajo se ha realizado con el apoyo de los siguientes proyectos de investigación: «Water resources management in a changing environment; The impact of sediment on sustainability» - WARMICE (ENV-Ct98-0789), «Debrisfall assesment in mountain catchments for local end users» - DAMOCLES (EVG1-1999-00027P), fi-

nanciados por la Comisión Europea, y «Efectos hidrológicos de los cambios de uso del suelo a diferentes escalas espaciales» - HIDROESCALA (REN2000-1709-C04-01/GLO) y «Procesos hidrológicos en áreas seminaturales mediterráneas» - PHOISEM (REN2001-2268-Co2-01/HID), financiados por la CICYT.

B I B L I O G R A F Í A

- AL-TAIEE, T. H. (1990): *The influence of a Dam on the downstream degradation of a river bed: case study of the Tigris River* (Proceedings of two Lausanne Symposia, August 1990). IAHS Publ. n° 194, 153-160.
- AMBERS, R. (2001): «Using the sediment record in a western Oregon flood-control reservoir to assess the influence of storm history and logging on sediment yield». *Journal of Hydrology* 244, 181-200.
- ANDREWS, E. D. (1986): «Downstream effects of Flaming Gorge Reservoir on the Green River, Colorado and Utah». *Geological Society of America Bulletin* 97, 1.012-1.023.
- AVENDAÑO, C., COBO, R., GÓMEZ, J. L. & SANZ, E. (1995): «Procedimiento para evaluar la degradación específica (erosión) de cuencas de embalses a partir de los sedimentos acumulados en los mismos. Aplicación al estudio de embalses españoles». *Ingeniería Civil* 99, 51-58.
- AVENDAÑO, C., SANZ, E., COBO, R. & GÓMEZ, J. L. (1997): «Sediment yield at Spanish reservoirs and its relationship with the drainage basin area». *Dix-neuvième Congrès des Grands Barrages*, Florence, 863-873.
- BRUNE, G. (1953): «Trap efficiency of reservoirs». *American Geophysical Union*, 34 (3), 407-419.
- BEGUERÍA, S., LÓPEZ-MORENO, J. I., SEEGER, M. & GARCÍA RUIZ, J. M. (en prensa): «Assessing the effects of climate oscillations and land-use changes on streamflow in the Central Spanish Pyrenees». *Ambio*.
- COBO, R., GÓMEZ, J. L., PLATA, A., SANZ, E. & AVENDAÑO, C. (1996): «Influencia del régimen de explotación del Embalse de Puentes en las tasas de sedimentación durante el período 1954-1994». *v Jornadas Españolas de Presas*, 155-169.
- COGNARD-PLANCQ, A. L., MARC, V., DIDON-LESCOT, J. F. & NORMAND, M. (2001): «The role of forest cover on streamflow down sub-Mediterranean mountain watersheds: a modeling approach». *J. Hydrol.*, 254: 229-243.
- DEARING, J. A., HAKANSON, B., LIEBERG-JONSSON, A., PERSSON, A., SKANSJO, S., WIDHOLM, D. & EL-DAOUSHY, F. (1987): «Lake sediments used to quantify the erosional response to land use change in southern Sweden». *Oikos* 50, 60-78.
- DEARING, J. A. (1991): «Lake sediments records of erosional processes». *Hydrobiología* 214, 99-106.
- EINSELE, G. & HINDERER, M. (1997): «Terrestrial sediment yield and lifetimes of reservoirs, lakes and larger basins». *Geol. Rundsch.* 86, 288-310.
- FOSTER, I. D. L., DEARING, J. A., SIMPSON, A. & CARTER, A. D. (1985): «Lake catchment based studies of erosion and denudation in the Merevale Catchment, Warwickshire, U. K.». *Earth Surface Processes and Landforms* 10, 45-68.
- GALLART, F., LLORENS, P., LATRON, J. & RABADÀ, D. (1997): «Hydrological functioning of Mediterranean mountain basins in Vallcebre, Catalonia: Some challenges for hydrological modeling». *Hydrological Processes*, 11: 1263-1272.
- GARCÍA-RUIZ, J. M. & PUIGDEFÁBREGAS, J. (1985): «Efectos de la construcción de pequeñas presas en cauces anastomosados del Pirineo Central». *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 11: 91-102.
- GARCÍA-RUIZ, J. M. & LASANTA, T. (1993): «Land-use conflicts as a result of land-use change in the Central Spanish Pyrenees: A review». *Mountain Research and Development*, 13: 295-304.
- GARCÍA-RUIZ, J. M., LASANTA, T., ORTIGOSA, L., RUIZ FLAÑO, P., MARTÍ, C. & GONZÁLEZ, C. (1995): «Sediment yield under different land-uses in the Spanish Pyrenees». *Mountain Research and Development*, 15: 241-249.
- GARCÍA-RUIZ, J. M., LASANTA, T., RUIZ FLAÑO, P., ORTIGOSA, L., WHITE, S., GONZÁLEZ, C. & MARTÍ, C. (1996): «Land-use changes and sustainable development in mountain areas. A case study in the Spanish Pyrenees». *Landscape Ecology*, 11: 267-277.
- GARCÍA-RUIZ, J. M., PUIGDEFÁBREGAS, J. & CREUS, J. (1986): «La acumulación de la nieve en el Pirineo Central y su influencia hidrológica». *Pirineos* 127, 27-72.
- GARCÍA-RUIZ, J. M., BEGUERÍA, S., LÓPEZ-MORENO, J. I., LORENTE, A. & SEEGER, M. (2001): *Los recursos hídricos superficiales del Pirineo aragonés y su evolución reciente*. Geoforma, Logroño, 192 págs.
- HARDEN, C. (1993): «Land use, soil erosion, and reservoir sedimentation in an andean drainage basin in Ecuador». *Mountain Research and Development* 13, 2, 177-184.
- HAY, B. J. (1994): «Sediment and water discharge rates of Turkish Black Sea rivers before and after hydropower dam construction». *Environmental Geology* 23, 276-283.
- HOSKING, J. R. M. (1990): «L-moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics». *Journal of the Royal Statistical Society. Serie B*, vol. 52: 105-124.

- LABADZ, J. C., BUTCHER, D. P., POTTER, W. R. & WHITE, P. (1995): «The delivery of sediment in upland reservoir systems». *Phys. Chem. Earth* 20, 2, 191-197.
- LASANTA, T. (1989): *Evolución reciente de la agricultura de montaña: El Pirineo aragonés*. Geofoma Ediciones, 220 págs., Logroño.
- LASANTA, T. & GARCÍA-RUIZ, J. M. (1998): «La gestión de los usos del suelo como estrategia para mejorar la producción y la calidad del agua. Resultados experimentales en el Pirineo Central español». *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 24: 39-57.
- LEWIS, J., MORI, S., KEPPELER, E. T. & ZIEMER, R. R. (2001): «Impacts of Logging on Storm Peak Flows, Flow volumes and suspended sediment loads in Caspar Creek, California». *Water Science and Application* 2, 85-125.
- LLORENS, P., POCH, R., LATRON, J. & GALLART, F. (1997): «Rainfall interception by a *Pinus sylvestris* forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area. I. Monitoring design and results down to the event scale». *J. Hydrol.*, 199: 331-345.
- LÓPEZ-MORENO, J. I., BEGUERÍA, S. & GARCÍA-RUIZ, J. M. (2001): «El régimen del embalse de Yesa (Cuenca alta del río Aragón, Pirineo Central) y su adaptación a la variabilidad del régimen fluvial». *Cuadernos de Investigación Geográfica* 26, 131-145.
- MANEUX, E., PROBST, J. L., VEYSSY, E. & ETCHEBER, H. (2001): «Assesment of dam trapping residence time: application to fluvial sediment transport in the Adour, Dordogne and Garonne Rivers basins (France)». *Water Resources Research* 37, 801-811.
- MARTÍNEZ CASTROVIEJO, R., INVAR, M., GÓMEZ VILLAR, A. & GARCÍA RUIZ, J. M. (1990): «Cambios en el cauce aguas debajo de una presa de retención de sedimentos». *I Reunión Nacional de Geomorfología*, Teruel, págs. 457-468.
- MCINTYRE, S. C. (1994): «Reservoir sedimentation linked to long-term changes in agricultural land use». *Water Resources Bulletin* 29, 3, 487-495.
- MOLINILLO, M., LASANTA, T. & GARCÍA RUIZ, J. M. (1997): «Managing mountainous degraded landscapes after farmland abandonment in the Central Spanish Pyrenees». *Environmental Management*, 21: 587-598.
- MORRIS, G. L. & FAN, J. (1997): *Reservoir Sedimentation Handbook*. McGraw-Hill.
- ORTIGOSA, L., GARCÍA-RUIZ, J. M. & GIL, E. (1990): «Land reclamation by reforestation in the Central Pyrenees». *Mountain Research and Development*, 10: 281-288.
- OSBORN, T. J., HULME, M., JONES, P., TRACY, A. & BASNETT, A. (2000): «Observed trends in the daily intensity of United Kingdom precipitation». *International Journal of Climatology* 20, 347-364.
- PUIGDEFÁBREGAS, J. (1976): «Pautas espaciales de variación climática en el Alto Aragón». *Publ. Centro Pir. Biol. Exp.* 7 (1): 23-34.
- SANZ, E., AVENDAÑO, C. & COBO, R. (1999): *Influencia de los embalses en el transporte de sedimentos hacia el delta del río Ebro (España)*. Manaus'99 - Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale Basins, 1-6.
- SHALASH, S. (1982): «Effects of sedimentation on the storage capacity of the High Aswan Dam reservoir». *Hydrobiologia* 92, 623-639.
- SMITH, S. (1990): «A revised estimate of the life span for Lake Nasser». *Environ. Geol. Water Scien.* 15, 2, 123-129.
- STOTT, A. P. (1987): «Medium-term effects of afforestation on sediment dynamics in a water supply catchment: a mineral magnetic interpretation of reservoir deposits in the maclesfield forest, N. W. England». *Earth Surface Processes and Landforms* 12, 619-630.
- VALERO-GARCÉS, B., NAVAS, A., MACHÍN, J. & WALLING, D. (1999): «Sediment sources and siltation in mountain reservoirs: a case study from the Central Spanish Pyrenees». *Geomorphology* 28, 23-41.
- VERSTRAETEN, G. & POESEN, J. (2000): «Estimating trap efficiency of small reservoirs and ponds: methods and implications for the assesment of sediment yield». *Progress in Physical Geography* 24, 2, 219-251.
- WALLING, D. E. (1983): «The sediment delivery problem». *Journal of Hydrology* 65, 209-237.

Recibido: 23 de septiembre de 2002

Aceptado: 14 de noviembre de 2002