

VARIABILIDAD TEMPORAL EN EL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DEL CURSO INFERIOR DEL RÍO EBRO

Jordi Prats, Josep Dolz

Grupo de investigación FLUMEN
E.T.S. Ing. Caminos, Universitat Politècnica de Catalunya
jordi.prats-rodriguez@upc.edu

Joan Armengol

Grupo de investigación FLUMEN
Facultad de Biología, Universidad de Barcelona

Resumen: La presencia de los embalses de Mequinenza, Riba-roja y Flix en el tramo inferior del río Ebro ha dado lugar a una serie de alteraciones (reducción de la entidad y frecuencia de las avenidas, estabilización de caudales, etc.) que han favorecido el desarrollo de macrófitos sumergidos. La variabilidad diaria y anual del régimen de caudales del tramo inferior del río Ebro como consecuencia de la regulación ejercida por los embalses se analiza en este trabajo. Los principales efectos son: importantes variaciones diarias de caudal, un menor caudal los fines de semana y la estabilización de los caudales mínimos. Asimismo, se analiza la influencia de la proliferación de macrófitos en el comportamiento hidráulico del río. En el período estudiado (2000-2006) el río presentó dos tipos de comportamiento hidráulico: un comportamiento que puede considerarse como ordinario, con el cauce limpio, y otro más lento, caracterizado por menores velocidades y mayores calados para un mismo caudal. Este segundo comportamiento coincidió con épocas de sequía, con caudales bajos durante gran parte del año y proliferación de macrófitos. El paso del comportamiento lento al comportamiento ordinario se produce con avenidas importantes, que tienen el poder suficiente para arrastrar a los macrófitos.

INTRODUCCIÓN

Los ríos son sistemas muy dinámicos desde diferentes puntos de vista (hidráulico, geomorfológico, biológico, etc.). De forma concreta, se trata de sistemas complejos en los que la modificación de algunas variables físicas afecta a procesos hidráulicos y geomorfológicos, así como a la comunidad de organismos fluviales. En otras ocasiones son los cambios en la comunidad biológica fluvial los que pueden afectar al comportamiento físico del sistema, como ocurre con el desarrollo de macrófitos. Cuando en el río se produce el desarrollo de una gran cantidad de macrófitos, tienen lugar cambios de intensidad variable en el funcionamiento hidráulico. Esto es debido a que hacen aumentar la resistencia al flujo y, por tanto, hacen disminuir la velocidad del agua (Chambers *et al.*, 1991; Sand-Jensen, 1998; Wilcock *et al.*, 1999), dando lugar a un aumento en el nivel del agua para un mismo caudal (Wilcock *et al.*, 1999; Champion y Tanner, 2000). Como resultado de estos

cambios se produce un incremento en la variabilidad de velocidades en una sección del cauce por la creación de zonas de baja velocidad del flujo donde se encuentran los macrófitos y zonas de mayor velocidad en las partes del cauce no afectadas (Sand-Jensen, 1998, Champion y Tanner, 2000). Por otra parte, los embalses también ejercen una importante regulación fluvial modificando el comportamiento hidráulico e hidrológico de los ríos (Petts, 1984; Batalla *et al.*, 2004).

En el río Ebro los embalses construidos en toda la cuenca (107 embalses de más de 1 hm³ y 7580 hm³ de capacidad total) producen una reducción muy importante del transporte de sedimentos (Guillén y Palanques, 1992; Ibáñez *et al.*, 1996; Roura, 2004; Vericat y Batalla, 2004; Négrel *et al.*, 2007) y la alteración del régimen hidrológico anual (Ibáñez *et al.*, 1996; Batalla *et al.*, 2004; Vericat y Batalla, 2004). Este efecto es mucho más importante en el tramo inferior del Ebro ya que la utilización de los embalses de Mequinenza, Riba-roja y Flix para la produc-

ción hidroeléctrica ocasiona importantes oscilaciones diarias del caudal (Ibáñez *et al.*, 1996; CHE, 2000; Val, 2003) y, en consecuencia, en el calado, la velocidad del agua y el hábitat disponible para los organismos. Todos estos cambios en el régimen de caudales en esta zona del Ebro, y concretamente la reducción de la frecuencia y entidad de las avenidas, la estabilización de caudales, y los procesos que tienen lugar en los embalses han favorecido la proliferación de macrófitos (Limnos, 1997; Champion y Tanner, 2000; Breugnot *et al.*, 2004; Palau *et al.*, 2004).

En los últimos años, en el tramo inferior del río Ebro, ha habido episodios de notables crecimientos de macrófitos y algas que dificultan la navegación y obturan las captaciones de agua. Las especies de macrófitos más abundantes en el tramo estudiado son *Myriophyllum spicatum*, *Potamogeton pectinatus* y *Ceratophyllum demersum* (Limnos, 1997; Palau *et al.*, 2004; Batalla *et al.*, 2006). De forma concreta se han producido obturaciones de la entrada del canal de captación de agua para la refrigeración de la central nuclear de Ascó obligando a parar los reactores en alguna ocasión (p.e. CSN, 2005). En otras ocasiones los macrófitos han reducido de forma notable la capacidad de los canales de riego, por causa del aumento de la resistencia al flujo. Para evitar estos problemas se han provocado crecidas desde los embalses para eliminar esta maleza acuática con resultados positivos (Palau *et al.*, 2004; Batalla *et al.*, 2006).

Los objetivos de este estudio son 1) analizar la variabilidad diaria y anual en el caudal del tramo inferior del Ebro como resultado de la actividad reguladora de los embalses en función de los diferentes usos del agua (hidroeléctrico, riego, refrigeración); y 2) estudiar la relación existente entre el comportamiento hidráulico del río (relación nivel-caudal, velocidad del agua y de los transitorios) y la proliferación de macrófitos.

ÁREA DE ESTUDIO

El tramo de río Ebro estudiado está comprendido entre el embalse de Flix y Tortosa y tiene una longitud de casi 70 km. El río Siurana, que entra por la margen izquierda, es el afluente más importante de esta zona si bien su caudal es insignificante con excepción de cuando se producen lluvias muy intensas en su cuenca.

Como se puede ver en la Figura 1 la parte baja del río está regulada por los embalses Mequinenza, Riba-roja y Flix. Los dos primeros tienen una capacidad de 1500 y 220 hm³ y tiempos de residencia del agua de 1-2,5 meses y unos 9 días

respectivamente. Por el contrario Flix tiene un volumen de 11 hm³ y el tiempo de residencia es de unas pocas horas, motivo por el cual tiene un comportamiento más propio de un río lento cuando es retenido por un azud.

Aguas abajo de la central hidroeléctrica de Flix se encuentran dos azudes. El primero está situado a unos 5 km de Flix (Figura 1), junto a la central nuclear de Ascó. Su principal función es la de derivar parte del caudal del río hacia el canal de captación de agua para el sistema de refrigeración de la misma (72,3 m³/s de concesión). Después de su uso, esta agua es retornada al río unos cientos de metros más abajo. El segundo azud, el de Xerta, se encuentra aproximadamente a 50 km de la central hidroeléctrica de Flix y es el punto en el que se inician los canales de riego de la margen derecha e izquierda del Ebro, siendo la concesión de caudal de 31 m³/s y 17 m³/s respectivamente. Como consecuencia de los embalses el caudal del río está fuertemente regulado, aunque sufre variaciones en función de la intensidad de las lluvias o de las sequías extremas. En la Tabla 1 se puede ver la variabilidad en el caudal medio anual medido en la estación de aforos de la Confederación Hidrográfica del Ebro en Tortosa. Aunque hay una gran variabilidad en el caudal medio anual, se considera que en los últimos años se ha producido una reducción del mismo, ya que para el periodo 1954-2003 este caudal fue de unos 400 m³/s, mientras que en los años 2000-06 este valor se redujo a unos 300 m³/s.

MATERIAL Y MÉTODOS

Instrumentación y datos utilizados

En el tramo de río entre Flix y Tortosa se ha instalado una red de sensores de nivel y de temperatura. Las estaciones de medida se encuentran a la salida de la central hidroeléctrica de Flix, en la entrada del canal de captación de la central nuclear de Ascó, en el Pas de l'Ase, en el molino de Miravet e inmediatamente después del azud de Xerta (Figura 2). En cada punto se ha medido el nivel y la temperatura del agua excepto en el Pas de l'Ase, donde solo se ha medido la temperatura. Los sensores de temperatura utilizados son termistores pt100 con una precisión de 0,1 °C, mientras que el nivel se ha medido con transductores de presión con una precisión del 1,0 % entre -10 °C y 50 °C. Los sensores estaban acoplados a un datalogger Campbell CR10X que recibía las medidas realizadas cada minuto y guardaba las medias a intervalos de 10 minutos.

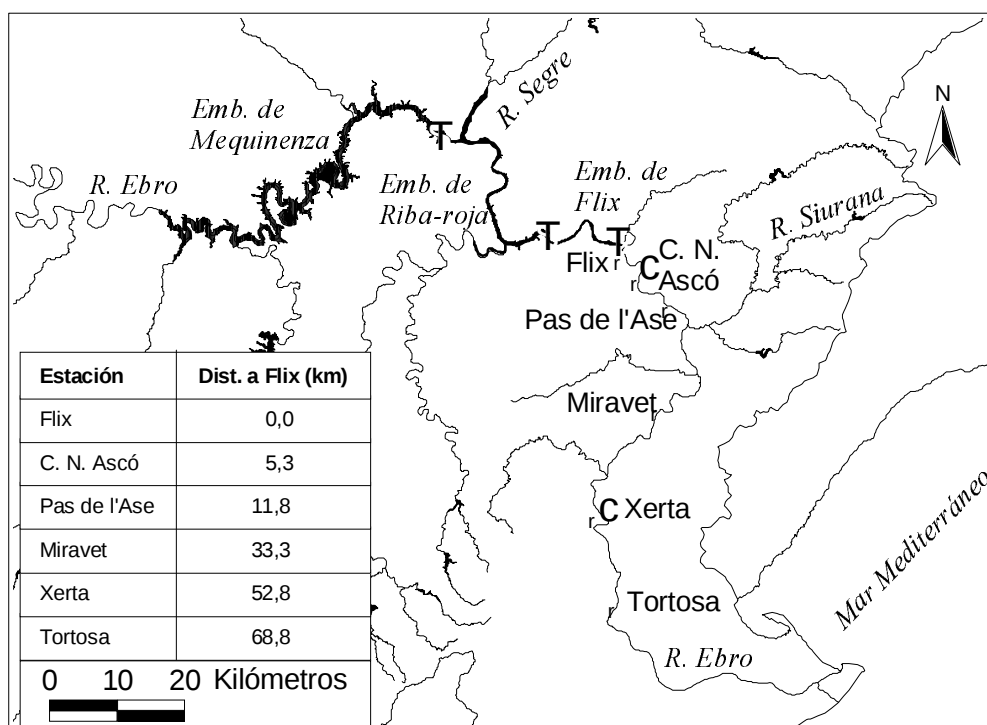


Figura 1. Área de estudio. Se indican las ubicaciones de los puntos de medida (*), las presas (△) y los azudes (□)

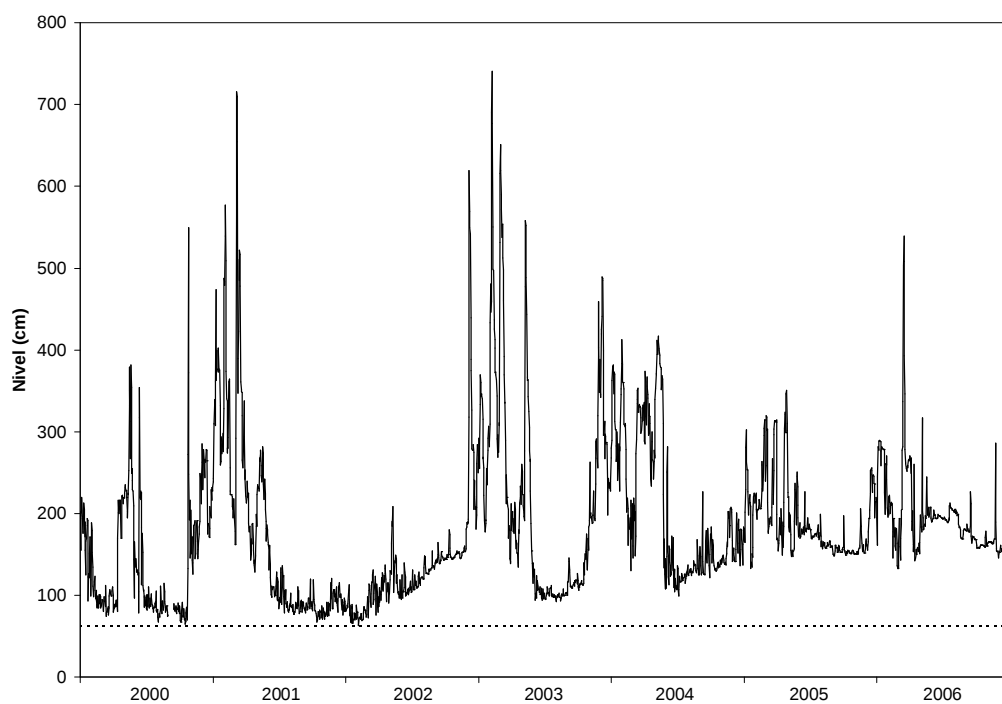


Figura 2. Nivel medio diario en Miravet para los años 2000 a 2006. Se muestra también el mínimo nivel medido (63,1 cm) como referencia. Las cotas son relativas

Año	Caudal máximo diario medido (m^3/s)	Caudal mínimo diario (m^3/s)	Caudal medio anual (m^3/s)
2000	1697,0	54,7	244,2
2001	2368,8	92,8	343,0
2002	1346,3	86,0	170,8
2003	2475,2	82,0	437,0
2004	1053,0	83,2	374,9
2005	667,4	77,6	217,6
2006	1288,9	77,3	190,1

Tabla 1. Caudal máximo y mínimo diario y caudal medio anual medido en Tortosa. [Fuente de los datos: Confederación Hidrográfica del Ebro (www.chebro.es)]

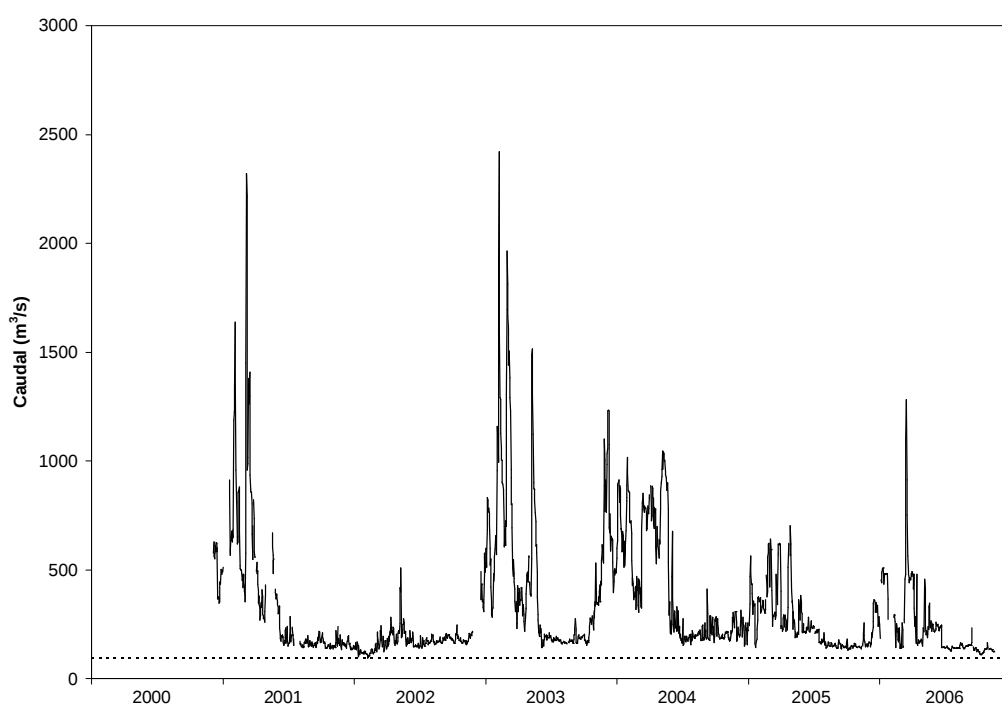


Figura 3. Nivel medio diario en Miravet para los años 2000 a 2006. Se muestra también el mínimo nivel medido (63,1 cm) como referencia. Las cotas son relativas

Además de la información recogida en la red de muestreo, también se han utilizado datos de niveles y caudales proporcionados por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) en Tortosa y del caudal derivado hacia los canales de riego del Delta del Ebro (Figura 3). Para garantizar la calidad de los datos de caudal medidos en Tortosa la CHE recalibra la curva nivel-caudales cuando se observan discrepancias respecto de aforos directos o respecto de las medidas del caudal turbinado por la central hidroeléctrica de Ribarroja (CHE, com. pers.). Cabe indicar que, dada la poca capacidad de regulación del embalse de Flix (cuyo nivel se mantiene prácticamente constante), el caudal turbinado en Ribarroja puede considerarse idéntico al que circula aguas abajo

de la presa de Flix.

Debido a que los intervalos de medición de caudal y nivel entre nuestra red, cada 10 minutos, y la de la CHE, cada 15 minutos, no coinciden, ha sido necesario realizar una transformación de los datos de la CHE. Para ello se ha hecho una interpolación de la serie para el periodo 2000-2006 seguida de la transformación de la serie a datos diez-minutales prescindiendo de los vacíos de la serie originales, que nunca pasan de unos pocos días. En el caso de la serie de caudales derivados por los canales de riego se ha seguido el mismo método si bien la información es más escasa, ya que no se dispone de datos anteriores al 3 de diciembre de 2000.

Celeridad de onda

La celeridad de la onda es la velocidad con la que se transmite río abajo una variación de caudal y nivel, y suele ser más rápida que la velocidad media del agua. Para estudiar la celeridad de la onda, en el tramo inferior del Ebro se ha calculado el tiempo de desplazamiento de los transitorios de nivel entre diferentes puntos del tramo de río estudiado.

El método usado se inspira en el método utilizado por Val (2003) y consiste en calcular el coeficiente de correlación de series de nivel continuas (sin espacios vacíos en los datos) de 250 medidas (2490 min. o 41,5 h) entre dos estaciones para diferentes desfases temporales:

$$r_i = \text{correlación}(N_1(t), N_2(t + \Delta t_i)) \quad (1)$$

donde N_1 es la serie de niveles medida en la estación situada aguas arriba, N_2 es la serie de niveles de la estación aguas abajo y Δt_i son los diferentes desfases. Aquel desfase para el cual el coeficiente de correlación es máximo ha sido considerado como el tiempo de viaje de la onda siempre y cuando $r_i > 0,9$. Si $r_i \leq 0,9$ se rechazaba el valor. Cabe indicar que hay períodos de tiempo en los que los caudales son muy constantes y en estas condiciones el método no da buenos resultados por la baja correlación entre las series. Dividiendo la serie de datos en subseries de 250 medidas podemos obtener el tiempo de viaje para diferentes niveles, ya que la celeridad de la onda varía con el caudal. Una vez conocido el tiempo de viaje de la onda, es posible determinar su velocidad c dividiendo la longitud del tramo considerado por el tiempo que ha tardado la onda en cruzarlo.

Determinación del caudal

La relación nivel-caudal para la estación de Miravet se ha obtenido a partir de los caudales medidos por la CHE en Tortosa. Así el caudal en Miravet se ha calculado como la suma del caudal del Ebro en Tortosa más los que se derivan por los canales del Delta de la Ebro en el azud de Xerta, corregidos teniendo en cuenta el tiempo que necesita el transitorio para desplazarse entre Xerta y Tortosa. A continuación, se ha comparado el nivel medio diario en Miravet con el caudal medio diario en Tortosa (más el caudal de los canales) con el correspondiente desfase temporal, calculado según el método explicado en el apartado anterior. La relación nivel-caudal obtenida para Miravet se ajustó mediante una función polinómica.

Velocidad del agua

La velocidad del agua se ha calculado para el tramo comprendido entre Pas de l'Ase y Miravet utilizando la temperatura del agua como trazador. De forma general, la temperatura del agua no se puede considerar un buen trazador ya que su valor se modifica a lo largo del tramo estudiado a causa del intercambio de calor con el entorno. Sin embargo, en ocasiones se producen paradas de los reactores de la central nuclear de Ascó que hacen bajar bruscamente la temperatura del agua. Cuando se produce uno de estos acontecimientos se puede detectar el efecto filtrando la serie de temperaturas mediante una media móvil de un día que elimina las variaciones diarias naturales.

En los casos en los que se han producido paradas en la C. N. de Ascó, la velocidad del agua se ha calculado mediante series de datos que comprendieran un intervalo de tiempo de una semana, elegidas de forma que la parada de los reactores quedase aproximadamente en la mitad del periodo elegido. De forma adicional, y para facilitar el cálculo, se han elegido períodos en los que no hubiera variaciones importantes en el caudal del río y en que las condiciones meteorológicas fueran estacionarias.

Como en el caso del tiempo de viaje de los transitorios, se calculó para qué desfase temporal entre las series de temperatura del agua en Pas de l'Ase y en Miravet era mayor el coeficiente de correlación. También en este caso la velocidad del agua es el resultado de dividir la distancia entre estas dos estaciones por el desfase temporal entre las dos series de temperatura.

Después del análisis detallado de toda la información disponible se han utilizado 11 series de datos que cumplían todos los requerimientos señalados anteriormente y que están comprendidas entre el 4 de mayo de 2000 y el 30 de mayo de 2006.

RESULTADOS

Caracterización del caudal del Ebro a diferentes escalas temporales

Para el estudio de la variabilidad del caudal en el tramo inferior del río Ebro se han utilizado los datos obtenidos por la CHE en la estación de aforo de Tortosa en el período 2000-2006 (Figura 3). Como se puede ver en la Figura 4, en la que se muestra la distribución de frecuencias de los caudales horarios para el periodo estudiado, la mayor parte del tiempo el caudal ha sido inferior a 250 m³/s, sobrepasándose raramente los 1000 m³/s.

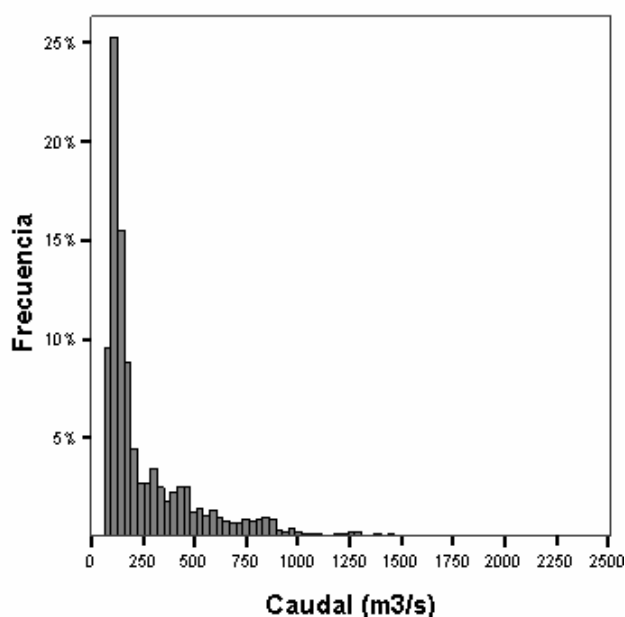


Figura 4. Distribución de frecuencias de los caudales horarios registrados en la estación de aforo de la CHE en Tortosa en el período 2000-2006

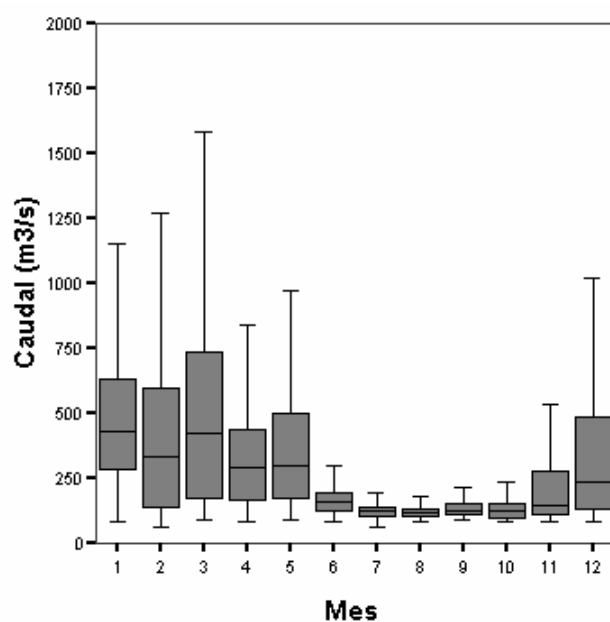


Figura 5. Boxplot de los caudales horarios medidos por la CHE en el período 2000-2006 en la estación de Tortosa en función del mes del año. Las cajas encierran los valores comprendidos entre el primer y tercer cuartil, y muestran la mediana. Los bigotes indican los valores comprendidos como máximo hasta 1,5 veces el rango intercuartílico por encima del tercer cuartil o por debajo del primer cuartil

El ciclo medio anual en el Ebro (Figura 5) es pluvionival como lo demuestra que los caudales más elevados se producen de diciembre a mayo como consecuencia de la combinación de lluvias otoñales y deshielo primaveral. No obstante, en el período estudiado ha habido una importan-

te variabilidad interanual para estos meses, registrándose tanto caudales medios horarios inferiores a los $250 \text{ m}^3/\text{s}$ durante gran parte del tiempo como superiores a los $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ por cortos períodos de tiempo. De junio a octubre el caudal medio mensual ha estado alrededor de

los 140 m³/s y raramente ha sido inferior a los 80 m³/s.

A pequeñas escalas de tiempo, semanal o diaria, las fluctuaciones en el caudal son importantes y en condiciones normales, es decir sin crecidas, están fuertemente condicionadas por el funcionamiento de las centrales hidroeléctricas. Así, a escala semanal los caudales no son uniformes (Figura 6). De martes a viernes los caudales

medios son elevados y prácticamente idénticos, siendo significativamente menores de sábado a lunes. A escala diaria los caudales son mínimos a las 14-16 horas (hora solar) y máximos por la noche (Figura 7). La magnitud de estas variaciones diarias de caudal puede superar fácilmente los 100 m³/s (Figura 8), pudiendo darse que el caudal máximo diario sea el doble e incluso el triple del caudal mínimo (Figura 9).

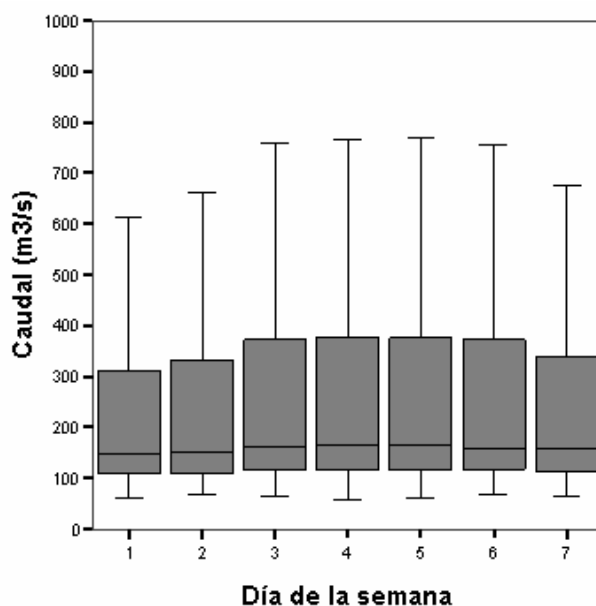


Figura 6. Boxplot de los caudales horarios medidos por la CHE en la estación de Tortosa en función del día de la semana (Domingo = 1, Lunes = 2, ..., Sábado = 7). Período 2000-2006

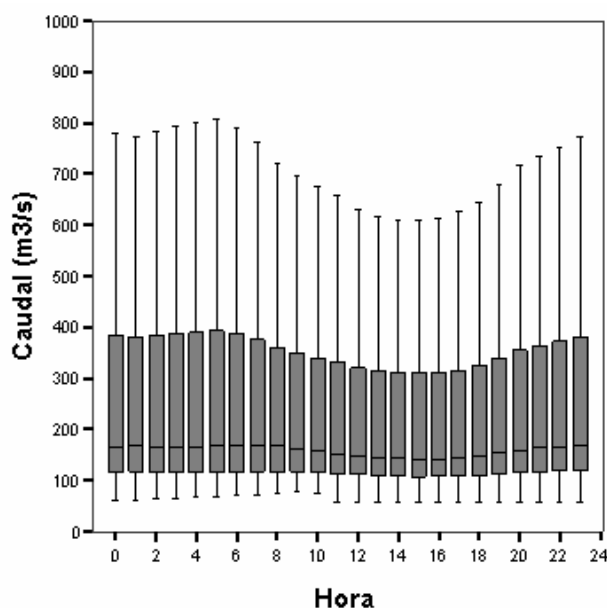


Figura 7. Boxplot de los caudales horarios medidos por la CHE en la estación de Tortosa en el período 2000-2006 en función de la hora del día (hora solar). Período 2000-2006

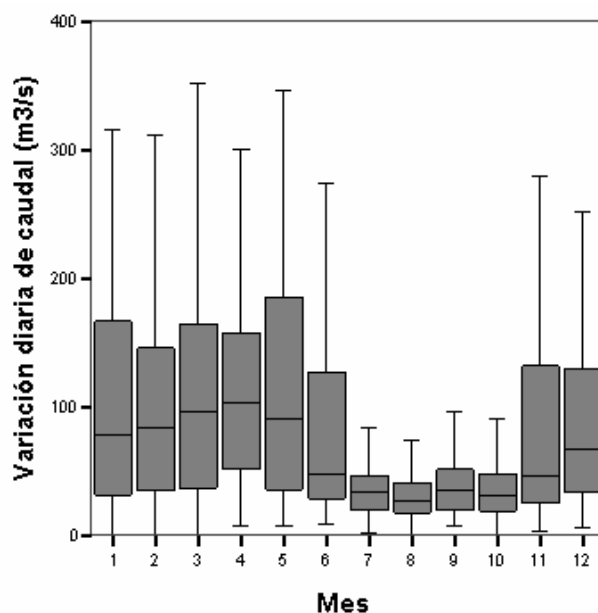


Figura 8. Boxplot de la variación diaria del caudal horario (caudal máximo menos caudal mínimo a lo largo del día) en función del mes del año. [Datos horarios de la CHE en Tortosa, años 2000-2006]

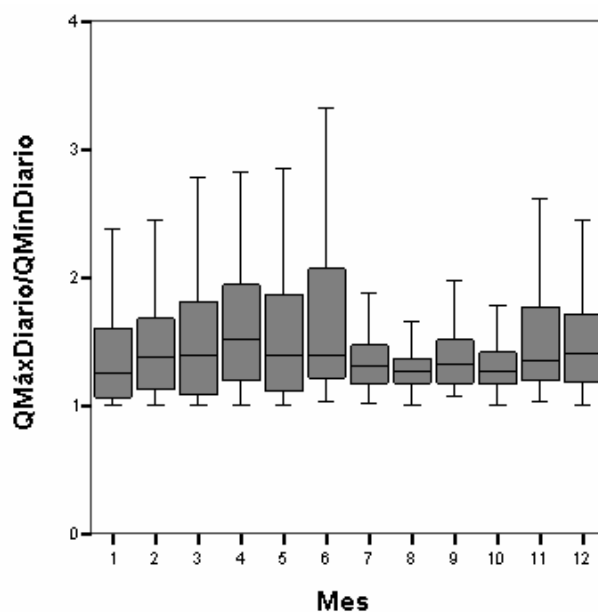


Figura 9. Boxplot de la variación diaria del caudal horario (caudal máximo entre caudal mínimo diario a lo largo del día) en función del mes del año. [Datos horarios de la CHE en Tortosa, años 2000-2006]

Comportamiento hidráulico del Ebro a lo largo del período de estudio

Cuando se comparan los niveles del agua en Miravet (Figura 2) con el caudal en Tortosa (Figura 3) se puede observar que hay un cambio en el comportamiento de los valores mínimos a lo largo del período estudiado. Mientras que los

caudales mínimos son bastante parecidos de un año a otro, los niveles mínimos presentan una mayor variabilidad respecto a la que deberían tener si la relación nivel-caudal fuera constante. Esto indica que el río presenta un diferente comportamiento hidráulico, ya que hay ocasiones en las que para un mismo caudal el nivel del agua es

superior. Las posibles causas de este comportamiento hidráulico son la modificación del cauce como consecuencia de la acumulación de sedimentos o el crecimiento de macrófitos. Como el tramo estudiado está situado aguas abajo de los embalses, y los estudios previos de Guillén y Palanques (1992), Ibáñez *et al.* (1996) y Roura (2004) han mostrado que los sedimentos son retenidos mayoritariamente en los embalses, se asume que los macrófitos son la causa de las variaciones del comportamiento hidráulico que se han detectado.

Para estudiar la variación en el tiempo de la relación nivel-caudal se ha utilizado una curva tipo que cumpliera dos condiciones principales: (1) que no se hubieran observado grandes masas de macrófitos en el río en el período para el cual se obtuviera la curva, y (2) que la variabilidad de nivel y caudal abarcara un rango suficientemente amplio. La curva tipo elegida ha sido la relación nivel/caudal obtenida para la serie de datos comprendida entre enero y octubre de 2001, ya que es a partir de octubre de ese año que se observan importantes masas de macrófitos en el Ebro (Batalla *et al.*, 2006). Además, en ese período el rango de caudales fue bastante amplio ya que estuvo comprendido entre 137 y 2320 m³/s.

Las medidas del nivel medio diario en Miravet se han dividido en dos grupos en función de su concordancia con la curva tipo (Figura 10). El grupo A se ha definido como aquel para el cual la relación nivel-caudal sigue aquella de la curva

tipo. Se han asignado al grupo B las medidas de nivel para las cuales esta relación no se cumple, siendo el nivel del agua mayor para un mismo caudal. Para ello se ha utilizado el criterio de que los datos tuvieran una desviación respecto de la curva tipo mayor que la máxima desviación respecto de la misma observada en la serie de datos de referencia utilizada para definirla. Según esta clasificación el comportamiento A se da aproximadamente del 3 de diciembre de 2000 al 3 de agosto de 2002, del 5 de febrero al 30 octubre de 2003 y del 25 de noviembre de 2003 al 29 de agosto de 2004 (Figura 11). Anteriormente al 3 de diciembre no se disponen datos de los caudales derivados a los canales del Delta del Ebro y, por lo tanto, no es posible determinar el caudal para un determinado nivel en Miravet para esas fechas. Como muestra la Figura 11, se puede observar que el cambio del comportamiento A al B se produce en períodos de caudales bajos sin avenidas importantes, en general en verano u otoño. El cambio del comportamiento B al A se produce justo cuando hay avenidas importantes, como pasó por ejemplo al inicio del año 2003. La causa de estos cambios de comportamiento hidráulico muy probablemente se puede atribuir a la proliferación de macrófitos (cambio del comportamiento A al B) y su arrastre por las avenidas (comportamiento B al A). Precisamente, en coincidencia con los períodos con comportamiento de tipo B se observaron grandes masas de

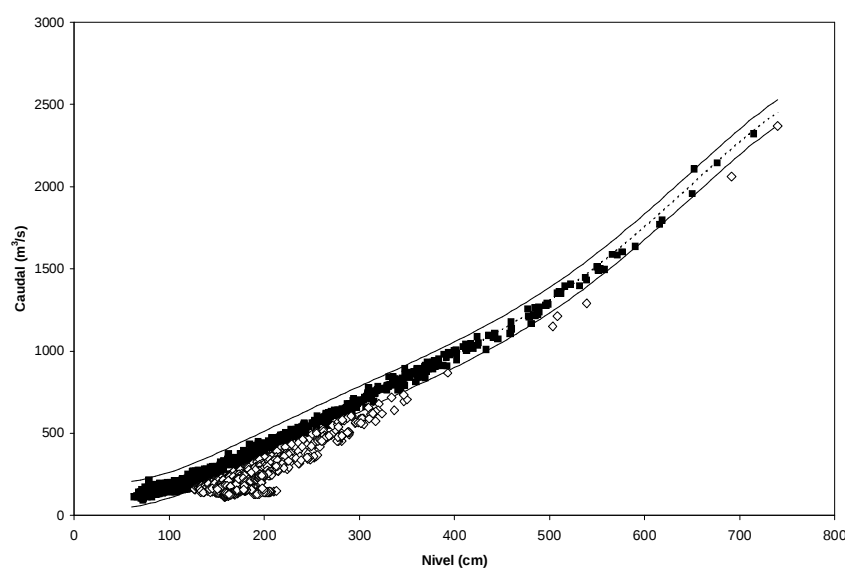


Figura 10. Relación nivel-caudal (valores medios diarios) en Miravet entre el 2000 y el 2006. El nivel se indica en cotas relativas. Se ha indicado con cuadrados negros el comportamiento de tipo A y con cuadrados blancos el comportamiento de tipo B. En trazo discontinuo se representa la curva tipo y en trazo continuo los límites utilizados para considerar un dato como perteneciente al grupo A (v. texto)

macrófitos en el río Ebro. En verano de 2002 la central nuclear de Ascó sufrió paradas del reactor o bajadas de carga por causa de la presencia de macrófitos en el canal de captación de agua para refrigeración (CNA, com. pers.) y era notable la presencia de macrófitos en el río (Grup de Natura Freixe, 2003). Asimismo fue importante la presencia de macrófitos en los años 2005 y 2006 (La Veu de l'Ebre, 2006). Por otra parte, en agosto de 2003, unos meses antes del período de comportamiento B de noviembre del mismo año, se produjo una bajada de carga en la cen-

tral nuclear de Ascó por una avalancha de algas (CNA, com. pers.).

La velocidad del transitorio propia de los dos comportamientos se puede ver en la Figura 12 en función del caudal y en la Figura 13 en función del nivel. Se observa que en el comportamiento B la velocidad del transitorio es más lenta que en el A. Una cosa semejante sucede con la velocidad del agua (Figura 14). Además, la Figura 10 muestra que para un mismo caudal el nivel del agua es más alto en el comportamiento B.

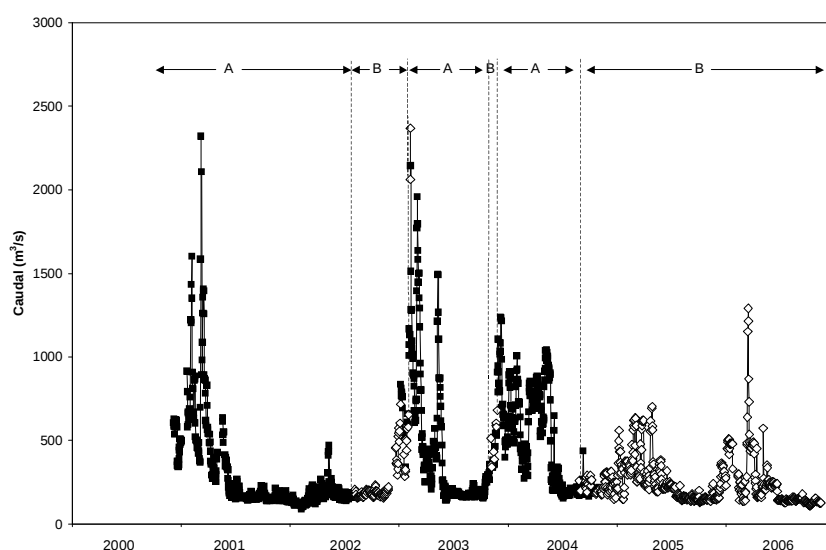


Figura 11. Caudales medios diarios en Miravet. Se indican con diferentes símbolos los diferentes comportamientos hidráulicos observados en la Figura 10: A, cuadrados negros, y B, cuadrados blancos

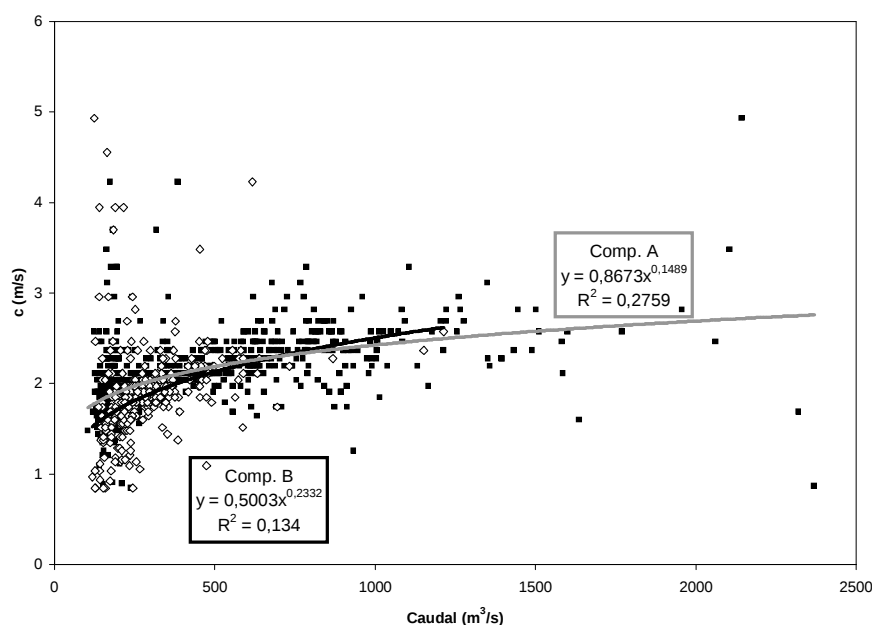


Figura 12. Velocidad del transitorio entre Miravet y Tortosa para los dos comportamientos observados A (cuadrados negros) y B (rombos blancos) en función del caudal. Los valores de los coeficientes son estadísticamente significativos al nivel del 0,001

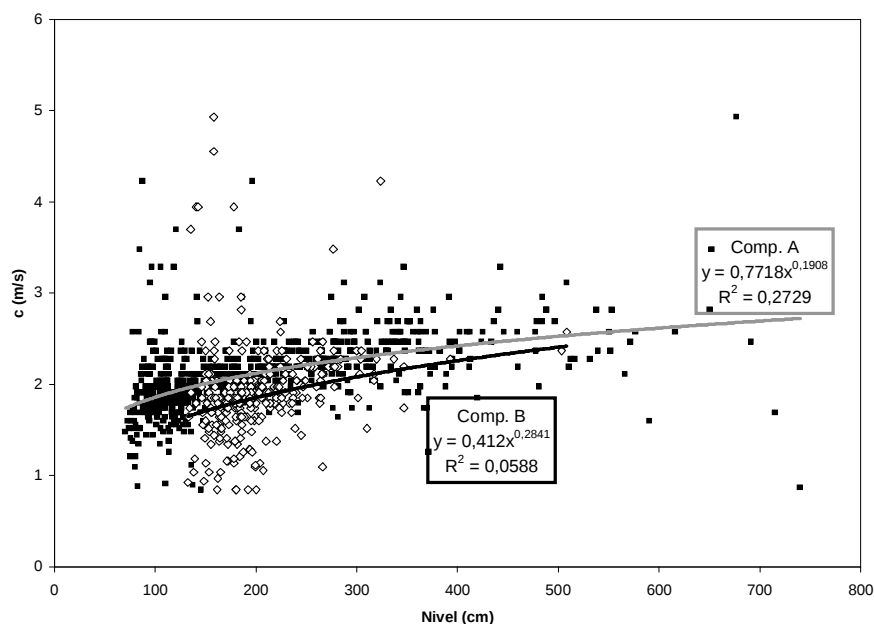


Figura 13. Velocidad del transitorio entre Miravet y Tortosa para los dos comportamientos observados A (cuadrados negros) y B (rombos blancos) en función del nivel. Los valores de los coeficientes son estadísticamente significativos al nivel del 0,001

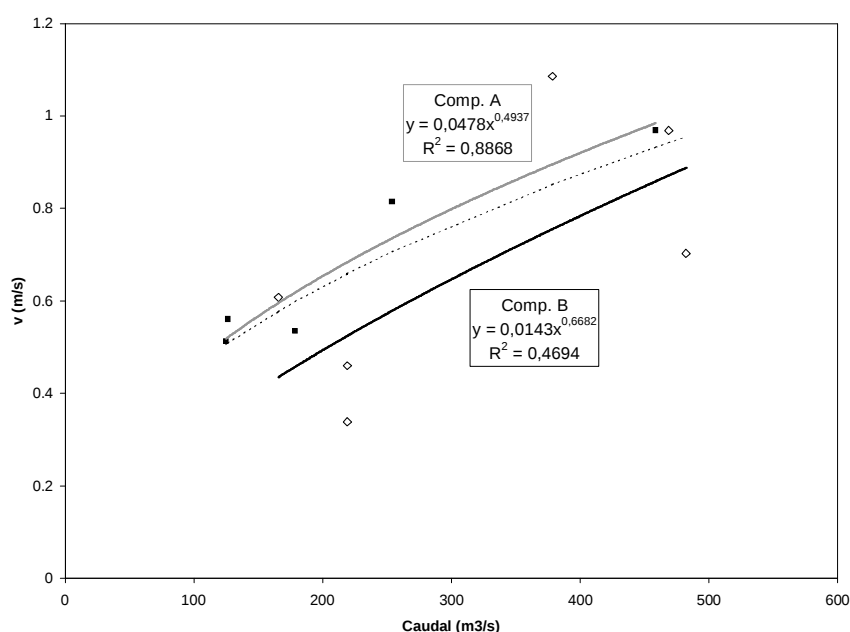


Figura 14. Velocidad del agua obtenida a partir de las paradas de la central nuclear en el tramo Pas de l'Ase-Miravet. Con los cuadrados negros se indica el comportamiento A, con cuadrados blancos el B y con línea discontinua la relación caudal-velocidad obtenida por Pujol y Sánchez-Cabeza (1999) en el mismo tramo

DISCUSIÓN

Caracterización de los caudales del Ebro a lo largo del período de estudio

Entre las modificaciones en la dinámica fluvial del curso inferior del Ebro causadas por la pre-

sencia de embalses se encuentran los cambios en el régimen hidrológico anual. En la Figura 4 y la Figura 5 se observa que los caudales mínimos se mantienen por encima de un valor mínimo de 75 m³/s aproximadamente. Esto es debido a la necesidad de garantizar la concesión de la central

nuclear de Ascó, necesaria para la refrigeración del reactor ($72,30 \text{ m}^3/\text{s}$), y la concesión para los canales del Delta del Ebro ($48 \text{ m}^3/\text{s}$). Otro de los efectos notables de la regulación ejercida por el sistema de embalses de Mequinzenza, Riba-roja y Flix es la variación del caudal del río en función de las necesidades de producción hidroeléctrica. Esto se traduce en menores caudales los días (festivos), con una menor demanda eléctrica (Figura 6), y menores caudales en las horas del día cuando la demanda eléctrica es menor (Figura 7). Asimismo, existen importantes variaciones de caudal a lo largo del día (Figura 8, Figura 9).

Comportamiento hidráulico del Ebro a lo largo del período de estudio

El estudio del comportamiento hidráulico del río Ebro a lo largo del período 2000-2006 ha permitido identificar dos patrones diferentes (Figura 10). Por una parte tenemos el comportamiento tipo A, que podríamos considerar el patrón ordinario. De la otra, encontramos el comportamiento B, en qué la velocidad del agua es menor y los niveles son mayores para un mismo caudal. Este segundo comportamiento se caracteriza también por presentarse en épocas de bajos caudales y ausencia de avenidas importantes. Val (2003) en su tesis doctoral observó ya que la curva nivel-caudal obtenida utilizando datos del período 1998-2000 daba unos resultados suficientemente precisos hasta mayo de 1999. Pero a partir de junio de 1999, las estimaciones de caudal eran significativamente superiores al caudal medido por la CHE. Este hecho probablemente también era debido a un cambio de comportamiento hidráulico como el observado en el presente estudio.

La información disponible permite considerar que estos cambios en las características hidráulicas del río son debidos a la proliferación de macrófitos, que hacen aumentar la fricción. Gurnell y Midgley (1994) observaron también cómo el crecimiento de macrófitos podía causar variaciones en la relación nivel-caudal. Hay que tener en cuenta que se trata de vegetales sumergidos que, en el caso del Ebro, se ha observado que pueden formar trenzas de hasta cuatro metros de longitud (Royo, 2007), que pueden tener coberturas de hasta el 70 % en algunos tramos y llegar a biomásas de más de $1 \text{ kg}/\text{m}^2$ en peso fresco (Limnos, 1997).

En el año 2002 hubo diversas bajadas de carga o incluso paradas de los reactores de la central nuclear de Ascó por causa de la obturación de

la captación de agua por parte de los macrófitos (CNA, com. pers.) y era visible la presencia de acúmulos de plantas acuáticas flotando río abajo en varios tramos del río (Grup de Natura Freixe, 2003). El año 2005 también se registraron paradas de la central nuclear por causa de los macrófitos (CSN, 2005). Aquel año se llegaron a extraer hasta 40 toneladas diarias de macrófitos del río y el año siguiente la problemática fue igualmente importante (La Veu de l'Ebre, 2006). Estos crecimientos masivos de macrófitos se suponen causados principalmente por la reducción de fósforo disuelto (Ibáñez *et al.*, 2008). La reducción de fósforo disuelto comporta una reducción del fitoplancton del río y, por lo tanto, un incremento de la penetración de la luz, lo que favorece el crecimiento de los macrófitos. Otras posibles causas que se han citado son la disminución de avenidas por efecto de los embalses, lo que reduciría el arrastre de macrófitos, o el incremento de la transparencia por la retención en los embalses de gran parte de los sólidos arrastrados por el río (Palau *et al.*, 2004). Las avenidas importantes tienen como consecuencia el arrastre de los macrófitos sumergidos (Champion y Tanner, 2000; Breugnot *et al.*, 2004). En el río Ebro los macrófitos se ven favorecidos en ausencia de avenidas (Limnos, 1997) y se ha demostrado como las avenidas pueden limpiar el lecho del río de macrófitos (Palau *et al.*, 2004; Batalla *et al.*, 2006).

Chambers *et al.* (1991) muestran que la biomasa y densidad de macrófitos están afectadas por la velocidad del agua, dándose menor biomasa y densidad a mayor velocidad del agua. En concreto, en los ríos estudiados por estos autores, de características semejantes a las del río Ebro, el crecimiento de macrófitos (*P. pectinatus*) está limitado a velocidades del agua menores de 1 m/s . Según la Figura 14 en el río Ebro la velocidad del agua para caudales menores que $400\text{-}500 \text{ m}^3/\text{s}$ es menor que 1 m/s (Figura 14). En los años con comportamiento tipo B, normalmente no se supera un caudal medio diario de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 11). Por otra parte, cuando se da el comportamiento B, la velocidad del agua es menor para un mismo caudal, y por lo tanto es necesario un mayor caudal para eliminar los macrófitos.

El efecto de las avenidas puede observarse a partir de nuestros datos (Figura 11). El primero de los períodos de comportamiento B se inicia en verano del año 2002, después de un invierno muy seco. Es sabido que los máximos crecimientos de macrófitos se dan en verano (Chambers *et al.*,

1991; Breugnot *et al.*, 2004), cuando las temperaturas son más elevadas y los caudales menores, que en este caso se habrían visto favorecidos por los bajos caudales invernales, probablemente insuficientes para arrastrar los macrófitos crecidos durante el verano del año anterior. Sin embargo, la avenida de los días 4 y 5 de diciembre de 2002, con un pico de caudal de 1350 m³/s, consiguió arrancar la mayoría de los macrófitos presentes en el tramo inferior del río Ebro (Palau *et al.*, 2004), llegándose de nuevo al comportamiento hidráulico A. Posteriormente, en verano del año 2004 se produce un nuevo cambio de comportamiento, seguramente por causa del crecimiento estival de macrófitos, que se mantiene hasta el final del período de estudio. Es de destacar el hecho de que, si bien en este período de dos años hubo una avenida de más de 1000 m³/s (Figura 11), no se produjo un nuevo cambio hacia el comportamiento A. Es posible que la magnitud y duración de esta avenida no fuera suficiente para arrancar a los macrófitos o gran parte de ellos.

CONCLUSIONES

En el período 2000-2006 el caudal del tramo inferior del río Ebro ha estado por debajo de los 250 m³/s la mayor parte del tiempo, si bien raramente ha sido inferior a 80 m³/s. Este límite inferior es obligado por la necesidad de asegurar la concesión de la central nuclear de Ascó y de los canales del Delta del Ebro. Esto tiene como consecuencia una mayor regularidad del caudal a nivel estacional. A nivel semanal y diario se observan unas oscilaciones del caudal cíclicas causadas por la gestión hidroeléctrica de los embalses: el caudal suele ser mayor en los días y horas de mayor demanda de electricidad.

La reducción y regularización de los caudales circulantes, junto con la reducción de la concentración de fósforo y de sólidos en suspensión, han favorecido la proliferación de macrófitos aguas abajo del sistema de embalses de Mequinenza, Riba-roja y Flix. En los años más secos, estas proliferaciones pueden ser suficientemente importantes como para modificar el comportamiento hidráulico del río a causa del aumento de la fricción. Por comparación con una situación de referencia sin proliferaciones importantes de macrófitos, en el período 2000-2006 se pudieron determinar diferentes períodos (agosto de 2002 a enero de 2003, noviembre de 2003, septiembre de 2004 a finales de 2006) en que el río Ebro tenía un comportamiento hidráulico más lento (comportamiento B en el texto),

con una menor velocidad del agua y un mayor calado para el mismo nivel de la condición de referencia. Estos intervalos coincidieron con los períodos en que se dieron proliferaciones importantes de macrófitos. El cambio de este comportamiento lento al comportamiento hidráulico ordinario (comportamiento A) se produjo cuando había avenidas importantes, con capacidad de arrastrar a los macrófitos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el *Programa de Recursos Hídricos del Plan Nacional de Investigación y Desarrollo* y el Fondo Social Europeo, proyectos número CGL2004-05503-C02-01/HID, CGL2004-05503-C02-02/HID y CGL2008-06377-C02-02/BTE, y por el convenio con la Asociación Nuclear Ascó-Vandellós II. Hay que agradecer a la CHE y a la Asociación Nuclear Ascó-Vandellós II los datos proporcionados para la realización de este estudio.

REFERENCIAS

- Batalla, R.J., Gómez, C.M. y Kondolf, G.M., (2004). Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain). *Journal of Hydrology*, 290, 117–136.
- Batalla, R.J., Vericat, D. y Palau, A., (2006). Sediment transport during a flushing flow in the lower Ebro River. *Sediment Dynamics and the Hydromorphology of Fluvial Systems*, Proceedings of a symposium held in Dundee, UK, July 2006, IAHS Publ. 306.
- Breugnot, E., Dutartre, A., Laplace-Treytore, C. y Haury, J., (2004). Impacts of discontinuities on macrophyte dynamics in large rivers. Application to Adour-Garonne watershed (South-West of France). En *Fifth International Symposium on Ecohydraulics, Aquatic Habitats: Analysis & Restoration*, Madrid, 12–17 Septiembre 2004.
- Chambers, P.A., Prepas, E.E., Hamilton, H.R. y Bothwell, M.L., (1991). Current velocity and its effect on aquatic macrophytes in flowing waters. *Ecological Applications*, 1, 249–257.
- Champion, P.D. y Tanner, C.C., (2000). Seasonality of macrophytes and interaction with flow in a New Zealand lowland stream. *Hydrobiologia*, 441, 1–12.

- CHE: Confederación Hidrográfica del Ebro, (2000). Los aprovechamientos en la Cuenca del Ebro: afección en el régimen hidrológico fluvial. Oficina de Planificación Hidrológica, CHE, Zaragoza, 83 p.
- CSN: Consejo de Seguridad Nuclear, (2005). Notificación de suceso en la central nuclear de Ascó I y II (Tarragona). Nota de prensa, 30 de septiembre de 2005.
- Grup de Natura Freixe, (2003). Localització i avaluació de l'extensió de la invasió biològica per musclop zebra (*Dreissena polymorpha*) a l'Ebre l'any 2002. Direcció General de Boscos i Biodiversitat, 56 pp.
- Guillén, J. y Palanques, A., (1992). Sediment hydrodynamics in the lower course of a river highly regulated by dams: the Ebro River. *Sedimentology*, 39, 567–579.
- Gurnell, A.M. y Midgley, P., (1994). Aquatic weed growth and flow resistance: Influence on the relationship between discharge and stage over a 25 year river gauging station record. *Hydrological Processes*, 8 (1), 63–73.
- Ibáñez, C., Prat, N. y Canicio, A., (1996). Changes in the hydrology and sediment transport produced by large dams on the lower Ebro River and its estuary. *Regulated Rivers: Research & Management*, 12, 51–62.
- Ibáñez, C., Prat, N., Duran, C., Pardos, M., Munné, A., Andreu, R., Caiola, N., Cid, N., Hampel, H., Sánchez, R y Trobajo, R., (2008). Changes in dissolved nutrients in the lower Ebro River: Causes and consequences. *Limnetica*, 27 (1), 131–142.
- La Veu de l'Ebre, (2006). L'Idce prova una màquina que talla les algues de l'Ebre. La Veu de l'Ebre, 13 de junio de 2006.
- Limnos, (1997). Estudi dels efectes de l'abocament tèrmic de la central nuclear d'Ascó sobre les comunitats biològiques. Núm. projecte CE017685, Junta de Sanejament, Barcelona.
- Négrel, P., Roy, S., Petelet-Giraud, E., Millot, R. y Brenot, A., (2007). Long-term fluxes of dissolved and suspended matter in the Ebro River Basin (Spain). *Journal of Hydrology*, 342, 249–260.
- Palau, A., Batalla, R., Rosico, E., Meseguer, A. y Vericat, D., (2004). Management of water level and design of flushing floods for environmental river maintenance downstream of the Riba-roja reservoir (Lower Ebro River, NE Spain). *HYDRO 2004- A new era for Hydropower*, Porto, Portugal, 18-20 Octubre 2004.
- Petts, G.E., (1984) *Impounded Rivers: perspectives for ecological management*. Wiley-Interscience, New York, 326 pp.
- Pujol, L. y Sánchez-Cabeza, J.A., (1999). Determination of longitudinal dispersion coefficient and velocity of the Ebro river waters (Northeast Spain) using tritium as a radiotracer. *Journal of Environmental Radioactivity*, 45, 39–57.
- Roura, M., (2004). Incidència de l'embassament de Mequinensa en el transport de sòlids en suspensió i la qualitat de l'aigua del riu Ebre. Tesis doctoral, Facultat de Biologia, UB, Barcelona.
- Royo, R., (2007). La disminució de fòsfor a l'Ebre explica la gran proliferació de plantes aquàtiques. *El Punt*, 15 enero 2007.
- Sand-Jensen, K., (1998). Influence of submerged macrophytes on sediment composition and near-bed flow in lowland streams. *Freshwater Biology*, 39, 663–679.
- Val, R., (2003). Incidencia de los embalses en el comportamiento térmico del río. Caso del sistema de embalses Mequinensa-Ribarroja-Flix en el río Ebro. Tesis doctoral, ETSECCPB, UPC, Barcelona.
- Vericat, D. y Batalla, R.J., (2004). Efectos de las presas en la dinámica fluvial del curso bajo del río Ebro. *Cuaternario y Geomorfología*, 18 (2), 37–50.
- Wilcock, R.J., Champion, P.D., Nagels, J.W. y Croker, G.F., (1999). The influence of aquatic macrophytes on the hydraulic and physico-chemical properties of a New Zealand lowland stream. *Hydrobiologia*, 416, 203–214.