

VARIABILIDAD TEMPORAL DE CAUDALES: APLICACIÓN A LA GESTIÓN DE RÍOS REGULADOS

D. Baeza Sanz¹, F. Martínez-Capel² y D. García de Jalón Lastra¹

Resumen:

Los efectos de la regulación de caudales en los ríos modifican severamente la variabilidad del régimen de caudales, así como su estacionalidad. Esto supone una alteración muy grave, puesto que el régimen de caudales es determinante para mantener la estructura de las comunidades (Poff, et al., 1997) y el funcionamiento de los ecosistemas fluviales.

El estudio de un régimen de caudales debe contemplar un grupo de parámetros completo, y con significado biológico, que contemple la magnitud de los caudales; los momentos en que éstos se producen, su distribución y la frecuencia de sus variaciones en los años. (Richter, et al., 1997).

Con objeto de medir la alteración en los regímenes producidos por las regulaciones, se han estudiado 8 variables características del régimen de caudales de cinco tramos en la cuenca del Tajo; en años antes a una regulación producida por la construcción de una presa, obteniendo un rango de variación natural; y en años posteriores al funcionamiento de esta, con el fin de comparar la variación en estos parámetros producida por la regulación. En bastantes casos los valores obtenidos reflejan modificaciones fuera del rango de tolerancia propuesto.

Palabras clave: Régimen de caudales, parámetros hidrológicos, variabilidad hidrológica, frecuencia y ecosistema fluvial.

INTRODUCCIÓN

La irregularidad espacio-temporal hídrica española ha traído como consecuencia la regulación de los recursos hídricos, de tal forma que se pueda disponer de agua en los periodos más críticos del año, ya que el estiaje está caracterizado en nuestro país por unas aportaciones pluviales mínimas en muchas regiones y un aumento de las necesidades de abastecimiento.

Una de las soluciones adoptadas para paliar este problema ha sido la construcción de infraestructuras hidráulicas, con diversos objetivos primordiales. Las condiciones de utilización de esta agua son muy variadas, lo que lleva a que los patrones del almacenamiento, y la posterior distribución produce un régimen alterado particular de cada uso.

En nuestro país los usos del agua se distribuyen aproximadamente de la siguiente forma: 80 % agricultura, 14 % para uso doméstico y 6 % para la industria (Ministerio de Medio Ambiente, 1998). A pesar de la penuria hídrica a la que nos vemos sometidos en determinadas épocas del año los previsibles planes de cuenca en algunas zonas prevén crecimientos de consumo espectaculares, como el caso del sistema Guadiana II (149%) y el sistema Guadalete-Barbate (68%). También el consumo en las zonas turísticas experimenta crecimientos tremendos en la temporada estival (Esteban, 2000) por lo que la utilización del agua es muy variada y presenta situaciones cara al futuro muy diferentes en las distintas cuencas hidrográficas. Bajo esta perspectiva las alteraciones que se producirán en el medio acuático y en la distribución de caudales van a estar ligadas a la demanda y el uso de la actuación concreta que esté presente en cada río.

¹ Laboratorio de Hidrobiología, E.T.S. de Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid. Avda. Ramiro de Maeztu s/n, Madrid 28040. España. dobaeza@hotmail.com

² E.P.S. de Gandia (Universidad Politécnica de Valencia). Ctra. Nazaret-Oliva s/n. Gandia 46730, Valencia. España. fmcapel@dihma.upv.es

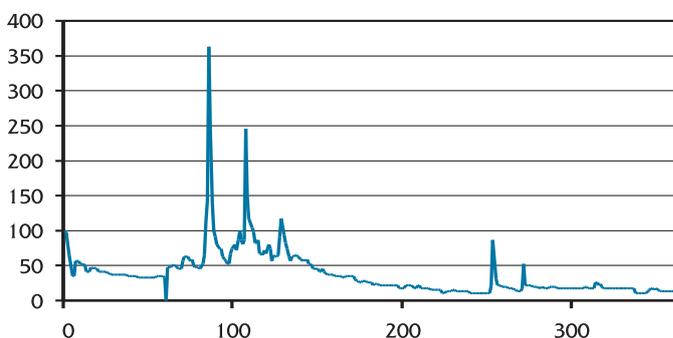
Artículo recibido el 5 de septiembre de 2002, recibido en forma revisada el 30 de enero de 2003 y aceptado para su publicación el 10 de junio de 2003. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

Las actuaciones hidráulicas producen alteraciones en los ecosistemas fluviales, que como carácter general suponen una reducción del caudal medio que fluye por nuestros ríos (Figura 1). Las presas no solamente disminuyen las aportaciones de agua a los ríos, sino que modifican severamente el régimen de caudales, modificando su estacionalidad, sus gradientes y su variabilidad tanto anual como interanual (p.ej. García de Jalón, 1987; Goudie, 2000). Éstas y otras alteraciones producen cambios dramáticos en el funcionamiento de estos ecosistemas alterando sus componentes físicos y la estructura de las poblaciones biológicas que los habitan. Entre estas alteraciones sobre los pobladores de nuestros ríos han sido bien estudiadas las producidas por las modificaciones en el tiempo, duración y frecuencia de las avenidas, aumentando las zonas lénticas frente a las lóxicas, alterándose la época de freza y la migración de los peces así como los lugares idóneos para la puesta o la cría.

El caudal es una de las variables de más importancia en el ecosistema fluvial (ver por ejemplo Brotons, 1988; Mayo et al., 1995; Lamouroux et al., 1999; Martínez-Capel et al., 1999) ya que es determinante en otras variables del medio sobre las que influye y a las que condiciona, como pueden ser la temperatura, la luz, la concentración de oxígeno la velocidad. Además, los caudales determinan la morfología fluvial, diseñando no solamente los cauces, sino también las zonas de ribera y en algunos casos la forma del valle. El aumento de la frecuencia o de la duración de las crecidas puede desplazar de sus hábitats a organismos pertenecientes a los grupos biológicos del perifiton, fitoplacton, macroinvertebrados y macrófitas, así como a los peces jóvenes y las puestas, por el efecto de arrastre que las grandes crecidas producen (ver p.ej. Jowett y Richardson, 1989; Salveit et al., 1995). Similares efectos se han detectado al modificar los periodos o duración de los estiajes.

El potencial de supervivencia de las poblaciones y especies se reduce si el sistema se lleva fuera del rango de variación natural. Así, fruto de sucesivas investigaciones sobre la relación entre la variabilidad hidrológica y el mantenimiento de la integridad del ecosistema, se ha sugerido lo que Richter et al. (1997) denominan el paradigma sobre los caudales naturales: “el rango total de variación intra e interanual en los regímenes hidrológicos, y sus características asociadas sobre tiempo, duración y frecuencia con su ratio de cambio, son críticas para sustentar la biodiversidad natural y la integridad de los ecosistemas acuáticos”.

Caudales diarios de 1928: Río Tajo
(régimen natural)



Caudales diarios de 1977: Río Tajo
(régimen regulado)

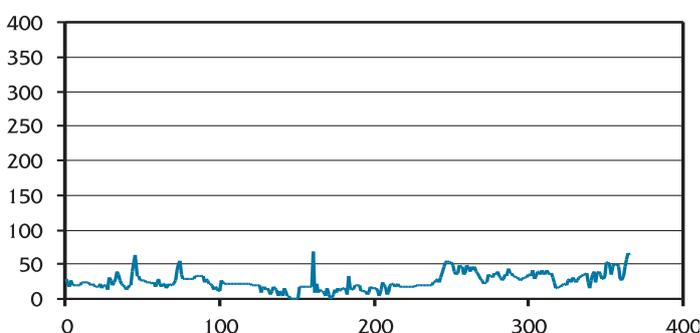


Figura 1. Variación del hidrograma diario del río Tajo, en un año antes de la regulación y en un año con el régimen regulado

Para tratar de paliar la inferencia del hombre en los caudales se han propuesto una serie de metodologías, que tratan de establecer los caudales que deben circular en los ríos para conseguir diversos objetivos, como por ejemplo el mantenimiento de una comunidad piscícola. Este conjunto de metodologías normalmente buscan el diseño de un caudal o régimen de caudales circulantes, lo que los gestores denominan como estudio del “caudal ecológico”, en tanto que buscan el mantenimiento de la estructura del ecosistema fluvial basándose en el estudio de una o varias especies indicadoras de su salud. Algunas de estas metodologías han sido criticadas por considerarlas demasiado simplistas (Williams, 1996), y no se acepta que obteniendo un único valor como caudal base o mínimo se pueda mantener la integridad del ecosistema. Además en muchos casos estos métodos no contemplan la variabilidad hidrológica como uno de los factores clave que determina la complejidad del sistema fluvial, y no realizan recomendaciones sobre el modo en que el caudal debe oscilar durante el año.

En este trabajo se propone un método de planificación con el cual caracterizar la variabilidad de caudales del río, mediante un grupo de parámetros representativos de su régimen. Estos parámetros se han obtenido en una serie de años en los que el río funcionó sin alteración, por lo que hemos obtenido un grupo de valores de cada uno correspondiente a cada año. De esta forma vemos como cada parámetro tiene una variabilidad natural dentro del intervalo de años de estudio. Igualmente se obtienen unos intervalos, para estos parámetros, lo que nos proporciona una idea de la variación dentro de la cual, debería mantenerse la gestión de caudales en los ríos regulados. Este grupo de parámetros debe ser fácil de manejar para que el gestor tenga una herramienta útil que le permita mantener el régimen de caudales del río dentro de las pautas naturales que presentó durante los años en que no estaba regulado.

El objetivo de la gestión debería ser que los caudales circulantes, tras la construcción de una obra hidráulica en el río, no se salieran de esos rangos de variación que podríamos llamar "naturales". Lo que se pretende conseguir es que no sólo se precisen los valores de caudal sino que también se establezca un rango de valores aceptables para su momento de ocurrencia en el año, su duración y su frecuencia en el caso de caudales extremos.

La gestión de los regímenes de caudales debería procurar la conservación de las cualidades del hábitat físico, que son primordiales para mantener, lo más íntegro posible, el ecosistema preexistente. Se trata de dar una respuesta rápida a los problemas de gestión que se plantean en las actuaciones hidráulicas, dado que los estudios que relacionan las poblaciones y las alteraciones producidas en los ecosistemas fluviales se suelen realizar a medio plazo, lo que en muchos casos los hace incompatibles con la toma de decisiones de las entidades gestoras del agua. No obstante, se necesita el seguimiento de los métodos aplicados a largo plazo, para comprobar el mantenimiento de los ecosistemas que se han visto afectados una vez que un nuevo régimen de caudales se ha impuesto.

Como análisis práctico se han caracterizado los caudales naturales de cinco ríos del centro de la península, determinando los intervalos de gestión y observando cuales se han dejado de cumplir una vez construidas las presas. Se comprueba que en muchos casos los regímenes se alejan mucho de los naturales, y que cada río y cada tipo de aprovechamiento, necesitan un tratamiento particular.

METODOLOGÍA

El método aquí descrito parte de la elaboración de un grupo de parámetros hidrológicos que caracterizan el régimen de caudales a través de sus crecidas, sus momentos de estiaje, y la magnitud de los cambios que se producen dentro del régimen anual. Estas variables se obtienen a partir del registro histórico de datos obtenidos en estaciones de aforo. Se utilizan 10 años naturales antes de que comenzara la regulación y otros 10 entre los últimos años de regulación. Estos registros son suficientes para caracterizar el régimen llamado "natural" y "regulado", dentro de las limitaciones que deben imponerse para que el estudio sea fiable pero manejable para el gestor.

Los datos se han tomado de 5 estaciones de aforos pertenecientes a ríos de la cuenca del Tajo: Tajo en Aranjuez, Tajuña en Masegoso, Jarama en el Vado, Sorbe en Beleña y Guadiela en Entrepeñas. Dichas estaciones se seleccionaron ya que hoy día están aguas abajo de presas y disponen de un registro de aforos de al menos 10 años, tanto antes como después de la construcción de la presa. Como base de cálculo de las variables propuestas para caracterizar el régimen de caudales, se han utilizado los caudales medios diarios extraídos de los anuarios de aforos de la Cuenca del Tajo (CEDEX; 1997)

Con los datos de caudales se han calculado 10 parámetros que caracterizan el régimen. Además, a partir de estos datos para 10 años se ha calculado su variación natural en los años, y que reflejan las oscilaciones en los regímenes en los diferentes años hidrológicos. Una forma de medir esta variación es calcular la desviación típica de las medidas y crear un intervalo que vaya desde la media menos la desviación típica hasta la media incrementada en la desviación típica, estableciéndose así el intervalo de confianza buscado para las "condiciones naturales", que se compara con la media obtenida de cada parámetro en condiciones de regulación. Si bien la elección de tan solo 10 años reduce la variabilidad reflejada en las condiciones naturales, creemos que este es un número óptimo dada la dificultad de encontrar registros de caudales diarios más prolongados en el tiempo para un gran número de ríos. El cálculo se ha realizado tomando diez años naturales consecutivos, que estuvieran completos desde el 1 de enero al 31 de diciembre, escogiendo los 10 primeros años disponibles antes de las obras hidráulicas (régimen natural) y los diez últimos años disponibles después de su construcción.

Las variables utilizadas han sido las siguientes:

- **Qmax.** El día del año en que se produce el caudal máximo (se toma referencia del año Juliano).
- **Q18.** El valor de caudal que sólo es superado un 5 % de los días del año. Este es el valor que ocupa el puesto 18 cuando se ordenan los caudales del año completo de mayor a menor. Este caudal representa un caudal de avenida en el régimen del río.
- **NQ36.** Número de días en que el caudal supera un límite superior cada año. Este límite es el percentil 90 de todos los datos de caudales diarios de los 10 años. Así conocemos la frecuencia con la que se producen situaciones de caudales punta en cada año.
- **25d.** Media móvil mínima para 25 días. Se ha obtenido calculando la media de caudal de 25 días consecutivos. De cada conjunto de medias se toma el valor mínimo, que es el Q25d. Este valor representa la media del grupo de 25 días seguidos temporalmente en el año que menos agua circula en el río. De idéntica manera se calcularon los 7d y 100d.
- **NQ10%.** Número de días en el que no se alcanza un umbral mínimo que es el 10 % del caudal modular. De este modo medimos la frecuencia con la que se producen las situaciones extremas de estiaje en cada año.
- **Qmin.** El día del año que se produce el caudal mínimo (se toma referencia del año Juliano).
- **CVintra.** El coeficiente de variación intranual. Es el cociente entre la desviación típica de los 365 caudales diarios del año y la media de caudales de dicho año. Este parámetro representa el contraste entre los caudales extremos en el año.
- **CVinter.** El coeficiente de variación interanual, que es el cociente entre la desviación típica de las medias de los diez años y el caudal modular. Este parámetro representa la variabilidad de valores medios en los años de la serie.

Una vez obtenidos los valores en cada uno de los 10 años previos a la actuación, se calcularon las medias de los diez años y sus desviaciones típicas, excepto en el CVinter del que sólo se puede obtener un valor para los 10 años.

El establecimiento de los umbrales dentro de los que son permisibles los cambios en los caudales después de la actuación se pueden seguir varios criterios, entre ellos cabrían porcentajes por encima o por debajo de la media o que los valores se encuentren dentro del valor máximo o mínimo encontrado en el régimen natural, como dijimos anteriormente creemos que la desviación típica mide bien la variación y en nuestro caso los umbrales se han calculado como la media \pm desviación típica, para ello a los valores medios de la serie se le han sumado y restado las desviaciones típicas obteniendo los dos umbrales máximos y mínimos, con lo que incluimos el 95% de los datos (si las distribuciones fueran normales), o al menos un valor bastante alto de datos que se consideran aceptables dentro del régimen de variación.

En último lugar, se comprueba si los valores de nuestros parámetros obtenidos, en los años después de la construcción de las presas, entran dentro de los intervalos que consideramos óptimos. El CVinter se comparó con el mismo parámetro antes y después de la regulación, puesto que este, por sí sólo, mide la variación en un intervalo de años. También se comparó, cuando resulto especialmente llamativo, el valor de la desviación típica de los valores en los diez años antes y después de la intervención, aunque lo que nos interesa es conocer si los valores característicos del régimen se mantienen dentro del rango de variación natural, también podemos con este análisis saber si existe variabilidad después.

RESULTADOS

Los valores obtenidos para cada parámetro en cada uno de los ríos, antes y después de la regulación, se pueden observar en la tabla 1.

Río Guadiela

En este río observamos un retraso en el día de caudal máximo de 45 días. Es decir, en el periodo de 10 años estudiado antes de la regulación, este suceso se daba como media el día 23 de abril, mientras que en los últimos 10 años esto ocurrió, como media, el 7 de junio. Este cambio ha sido considerable,

VARIABILIDAD TEMPORAL DE CAUDALES: APLICACIÓN A LA GESTIÓN DE RÍOS REGULADOS

Tabla 1. Resumen de los valores obtenidos agrupados por ríos. Se presenta la media del valor correspondiente al estudio antes de la actuación y después. También la desviación típica de los valores encontrados en los años.

	Guardiela				Jarama			
	Antes		Después		Antes		Después	
	Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
Día max m	113.10	101.92	157.50	97.47	54.10	48.34	76.00	58.50
Día Min	208.00	131.67	123.10	163.91	246.60	61.25	150.20	155.24
Q18	42.85	37.51	34.57	7.55	16.92	14.42	28.50	13.51
Q7d	3.36	2.80	4.02	4.08	0.44	0.34	0.39	0.31
Q25d	4.17	2.95	6.46	4.92	0.55	0.33	0.52	0.39
Q100d	6.23	3.76	10.50	6.93	0.97	0.43	1.03	1.04
Nº veces arriba	4.10	2.88	17.30	12.31	3.10	2.13	3.70	3.53
Nº veces abajo	1.40	2.50	8.80	10.08	2.70	2.71	1.50	1.35
Cvintra	1.06	0.35	0.65	0.24	1.24	0.41	0.93	0.37
Cvinter	0.51		0.38		0.42		0.49	
	Sorbe				Tajuña			
	Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica
Día max m	43.10	64.53	43.80	58.89	61.20	70.81	73.50	92.73
Día Min	206.70	101.53	206.60	93.10	224.70	116.63	168.70	120.44
Q18	23.69	10.65	17.14	17.28	7.12	4.13	3.61	2.89
Q7d	1.05	1.19	0.25	0.20	0.79	0.27	0.70	0.27
Q25d	1.23	1.26	0.25	0.20	0.83	0.28	0.74	0.28
Q100d	1.93	1.40	0.37	0.34	1.00	0.25	0.90	0.31
Nº veces arriba	5.40	2.50	3.80	2.97	6.20	3.68	4.00	2.62
Nº veces abajo	5.00	1.94	2.50	2.17	0.10	0.32	0.10	0.32
Cvintra	1.67	0.44	2.01	1.13	1.07	0.40	1.02	0.41
Cvinter	0.35		0.61		0.28		0.33	
	Tajo							
	Media	Desv. Típica	Media	Desv. Típica				
Día max m	45.50	64.67	62.20	72.67				
Día Min	249.90	85.01	124.60	57.96				
Q18	66.20	36.02	41.10	14.76				
Q7d	8.00	3.50	11.52	10.07				
Q25d	8.95	3.79	16.64	10.04				
Q100d	10.52	4.02	21.84	9.11				
Nº veces arriba	4.20	2.04	8.20	8.99				
Nº veces abajo	0.50	1.58	0.90	1.29				
Cvintra	0.97	0.28	0.39	0.06				
Cvinter	0.47		0.44					

teniendo en cuenta el cambio de estación y que en junio no suelen encontrarse los máximos de caudal en los ríos de régimen pluvial. Aún así, se ha encontrado que el valor posterior a la regulación se mantiene dentro del intervalo de confianza calculado en condiciones naturales. Por otra parte, el parámetro Q18 disminuyó un 20 % como media, pero se mantuvo dentro del intervalo de confianza de referencia (condiciones previas a la regulación), la desviación típica de los valores después de la regulación disminuyó muchísimo, lo que nos indica que esta presa amortigua las avenidas y las deja en valores muy constantes.

El número de días en que el caudal medio diario superó el percentil 90 fue de 13 días más, saliéndose del intervalo de confianza calculado. Esto refleja que las crecidas de caudal son en general de menor entidad, pero el hábitat fluvial sufre un mayor número de eventos excepcionales, como podrían llamarse los días que se supera el percentil 90 a lo largo del año.

En cuanto al día de caudal mínimo, se observó un adelanto de 85 días, pasando del 27 de julio al 3 de mayo. Si bien el segundo valor queda dentro del

intervalo de confianza previo, creemos que esta nueva media supone un cambio relevante, que refleja los nuevos objetivos de la gestión de caudales realizada. El número de días en que el caudal estuvo bajo el 10% del módulo anual aumentó de 1 a 9 días (saliéndose del intervalo de confianza), lo que refleja, unido a los parámetros anteriores, un aumento de la frecuencia de eventos extremos, tanto de sequías como de crecidas. Estos cambios se observan frecuentemente en estaciones donde la gestión se ha orientado principalmente hacia la gestión hidroeléctrica.

Los parámetros Q7d, Q25d y Q100d han aumentado bastante, de modo que los períodos de caudal mínimo en 7, 25 y 100 días consecutivos no muestran sequías tan intensas como anteriormente. El Q7d y el Q25d han permanecido en el intervalo de confianza previo a la regulación, a pesar de sus apreciables subidas (20 y 55 % respectivamente), en cambio el Q100d subió un 68 %, saliéndose de las condiciones naturales estudiadas.

Los parámetros con los que estudiamos la variabilidad de caudales han reflejado una mayor regularidad en el flujo, de modo que la variación intranual (que bajó un 39 %) quedó fuera del intervalo de referencia, también disminuyó el valor de su desviación típica de los valores obtenidos después de la regulación, algo que se repite en todos los ríos excepto el Sorbe, por último como efecto de la regulación de los caudales que ejerce esta presa, también el coeficiente de variación interanual descendió en un 25 %.

El río Guadiela tiene una regulación natural debido a que en su cuenca existe un gran acuífero con una amplia capacidad de almacenamiento, esto hace que se amortigüen bastante sus caudales extremos, por lo que es bastante normal que al regular su cauce aumente la frecuencia de los acontecimientos peculiares y se modifique la fecha en la que se producen. También es normal que la desviación típica de los valores obtenidos después de la regulación en cuanto a los caudales bajos, su frecuencia y el día en que se producen aumente, ya que se pierde el efecto que el acuífero ejerce sobre la constancia y la predecibilidad de los caudales de estiaje.

Río Jarama

En este río no se ha detectado un gran cambio en el día de caudal máximo, que cambió del 23 de febrero al 17 de marzo, conservándose dentro de las condiciones naturales previas. El Q 18 aumentó un 68 % y el percentil 90 se superó 1 día más respecto

a las condiciones naturales, manteniéndose en ambos casos dentro del intervalo admisible. Observamos por tanto que el régimen de crecidas no parece haberse alterado significativamente en estos períodos de tiempo.

El momento en que sucede el caudal mínimo sí ha sufrido un cambio drástico, pasando del 4 de septiembre al 30 de mayo, quedando fuera del intervalo deseable, también se ha producido un gran aumento en la desviación típica de los resultados de este parámetro después de la regulación, mientras que de forma natural este día no fue nunca antes de Junio, ahora ha llegado a ser incluso en Enero, lo que nos indica que el cerrar compuertas es algo bastante aleatorio y drástico en este río. En cambio no se han encontrado fuertes cambios en cuanto a los caudales de estiaje, ya que el Q7d, Q25d y el Q100 d registraron una bajada muy pequeña, manteniéndose dentro de los límites deseables. El número de días bajo el 10 % del módulo se redujo solo en un día, de modo que a pesar de encontrarse mínimas algo más bajas, los cambios en la magnitud de los eventos de estiaje no han sido importantes en el período estudiado.

En cuanto a la variabilidad de caudales, la variación intranual bajó un 25 %, pero manteniéndose dentro de los límites deseables, su desviación típica también bajó, y la variación interanual se elevó ligeramente, así pues no se ha detectado un aumento en la regularidad de los caudales.

Río Sorbe

En este río hemos observado que, sorprendentemente, los días de máximo y mínimo caudal en el año no han cambiado, aunque la magnitud de estos eventos sí que ha cambiado ligeramente. El día de máximo pasó del 12 al 13 de febrero, y el de mínimo se mantuvo en el día 26 de julio.

El parámetro Q18 bajó un 28%, y el número de días sobre el percentil 90 bajó en un día, quedando ambos dentro del intervalo que consideramos natural. Así pues, las crecidas se amortiguan pero sólo ligeramente.

El número de veces que el caudal es menor del 10 % del módulo bajó de 5 a 3 días, quedando en el límite del intervalo de confianza, mientras que las medias de Q7d, Q25d y Q100d tuvieron descensos importantes: un 76 %, 80 % y 80 % respectivamente. Los dos primeros quedaron dentro de los intervalos de confianza, pero el Q100d descendió por debajo de los límites de referencia,

además en los tres la variabilidad de los valores después de la regulación ha descendido, algo infrecuente en ríos regulados, para parámetros que miden magnitudes de caudales bajos. Por tanto podemos decir que en general se han recrudecido las sequías, aunque los cambios se mantienen dentro de la variabilidad natural estudiada, e incluso se hicieron en magnitud más constantes.

En cuanto a la variabilidad de los caudales, se observa que ha aumentado considerablemente, sobre todo comparando unos años con otros, ya que la variación intranual subió un 20 % (dentro del intervalo) y la interanual un 74 %. También es peculiar que a diferencia de lo que ocurre en los demás ríos, la variabilidad en los años del coeficiente de variación intraanual aumenta.

Río Tajo

En esta estación se ha observado un pequeño cambio en el día de máximo caudal, que cambió del 15 de febrero al 3 de marzo. Este cambio está dentro de los márgenes considerados por nosotros como normales, mientras que el caudal ha sobrepasado el percentil 90 en 4 días más que en las condiciones precedentes, saliendo por encima del intervalo de confianza. El Q18 ha sufrido un descenso del 38 %, lo que refleja un descenso general en las crecidas, aunque aumenta el número de picos.

Los extremos inferiores si han sufrido grandes cambios. El momento del mínimo anual se ha adelantado 125 días, del 7 de septiembre al 5 de mayo, de modo que se sale totalmente del intervalo definido por la variabilidad natural. El número de veces que se baja del 10% ha permanecido exactamente igual, pero las medias móviles mínimas de 7,25 y 100 días han sufrido un gran ascenso: el Q7d subió un 44%, el Q25d un 86 % y el Q100d se multiplicó por dos, saliendo los tres del intervalo de confianza, además en los tres casos aumento la desviación típica de estos valores después de la construcción de la presa, por las mismas razones apuntadas para el Guadiela. Así pues los descensos de caudal se han reducido mucho, de modo que el flujo parece haber perdido una gran variabilidad anual. Esto se ve reflejado también por la dramática reducción del CV_{intra}, que fue del 60%, fuera del intervalo de confianza deseado. También el CV interanual descendió en un 6%.

Río Tajuña

Las crecidas de este río se han reducido drásticamente, ya que el Q18 medio ha bajado un 49 %,

aunque se conserva dentro del intervalo natural calculado, pero su variación en los años después de la intervención, y como es normal en presas que laminan avenidas, se ha reducido. El número de crecidas sobre el percentil 90 ha pasado de 6 a 4 veces, quedando dentro del intervalo de confianza y el momento de pico máximo solo ha variado retrasándose 13 días, por lo que la organización temporal no ha variado significativamente.

Si ha cambiado la temporalidad de las sequías, ya que el día de caudal mínimo se ha adelantado 56 días, pero se mantiene dentro del intervalo de variabilidad natural. No se registró ningún día con caudal menor del 10 % del módulo, ni antes ni después de la regulación artificial. Los Q7d, Q25d y Q100d se redujeron ligeramente (una media del 10%) pero se mantuvieron en los intervalos deseables.

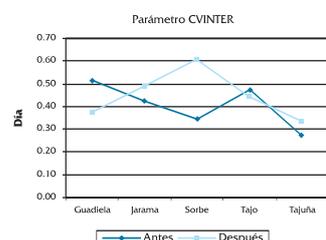
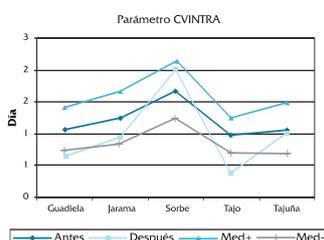
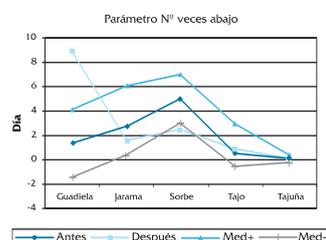
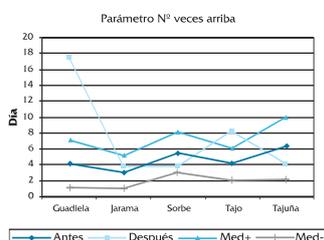
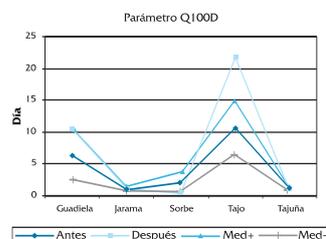
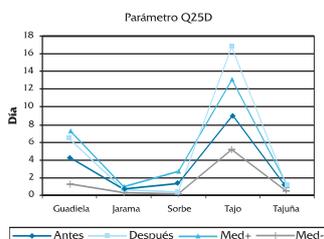
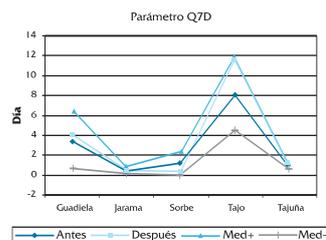
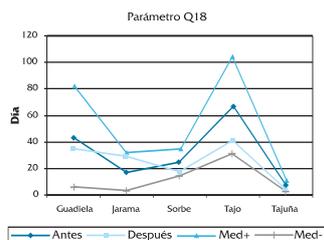
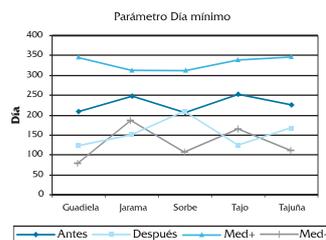
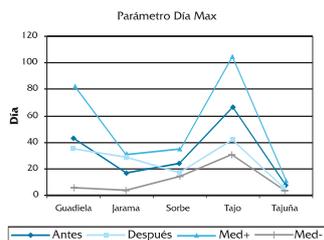
La variabilidad intranual bajó tan solo un 5 %, y el CV interanual subió un 18%, por lo que la variabilidad de caudales no se ha visto perjudicada en ningún caso.

Es un río que después de la regulación mantiene la variabilidad de los parámetros, bastante similar a las de los años anteriores a la intervención, incluido el coeficiente de variación intranual. Sin embargo, la variación del valor de caudal máximo baja, como lo hace en la mayoría de los otros ríos.

CONCLUSIONES

En la figura 2 se ha representado gráficamente los valores de los parámetros, antes y después de la intervención, además de los umbrales de confianza, para poder observar aquellos valores que después de la regulación se han salido de éstos.

El efecto más generalizado sobre el régimen de caudales, en los 5 ríos estudiados, ha sido la reducción de la magnitud de las avenidas, estimada a través del Q18, efecto lógico de la regulación que ha sido ampliamente recogido por la bibliografía (ver p.ej. Ward y Stanford, 1979). En este caso se ha dado la excepción del río Jarama, en el que el Q18 aumenta, debido probablemente a que el consumo de la ciudad de Madrid es prioritario en la gestión del Embalse del Vado, por parte del Canal de Isabel II, quien sistemáticamente mantiene sus compuertas cerradas mientras no sea necesario una gran suelta de apoyo, para sumar sus caudales a los que bajan del río Lozoya.



Con esta modificación desaparecerán determinados procesos hidrológicos y geomorfológicos que son específicos del caudal dominante, como son la creación de la secuencia de rápidos y pozas o de los depósitos de materiales en forma de barras en la dirección principal de la corriente (Wolman y Miller 1960, Miller 1990). Este caudal, construye el cauce y es al que se debe su morfología principalmente.

Otras características como el tamaño del sedimento que se transporta y su espectro de granulometría así como el movimiento de otros materiales que transporta el río como troncos, hojas, y otros restos orgánicos, se ven seriamente modificadas al disminuir la potencia hidráulica de los caudales de avenida, ya que estos son de una magnitud menor a la que ocurre de forma natural (Poff et al, 1997).

Por lo general se ha observado como el día de caudal máximo suele retrasarse, mientras que el día correspondiente al caudal mínimo se adelanta en el año natural. El caso más extremo resulta ser el río Jarama, cuyo mínimo anual se adelanta una media de 182 días (unos 6 meses), pasando de primeros del mes de septiembre (mínimo natural) a finales del mes de mayo.

La fecha en la que se producen los caudales extremos tanto altos como bajos es un indicador muy importante en el establecimiento de la vegetación de ribera, los cambios producidos en el momento en el que se producen las crecidas hacen que estas destruyan la labor de rebrote o germinación de los retoños si estas llegan a destiempo, impidiendo la colonización de nuevos ejemplares en la ribera, y la de los periodos de aguas bajas, entorpecerían la implantación de numerosas especies, que aprovechan esos momentos favorables, para establecerse; o repoblar nuevos territorios (Scott et al, 1996).

La alteración de la magnitud y el momento de las avenidas debido al control que las presas hacen en los caudales altos, es uno de los principales problemas en nuestros sotos, en los que al desaparecer el riesgo de inundabilidad, se ha ocupado el espacio por cultivos, haciendo disminuir la superficie que cubrían estos bosques, un caso alarmante es el del río Jarama en el que sus riberas ocupan actualmente en algunos tramos un 1,4 % de la superficie que podrían cubrir (Molina, 1999).

El parámetro Q25d no ha experimentado un cambio similar en los distintos ríos, ya que depende de muchos factores, incluyendo la gestión del embalse y las características hidrogeológicas de cada cuenca. La media móvil de un intervalo largo de días, 25 o 100 representa la constancia de los caudales bajos en el río, en los ríos con una gran capacidad de regulación natural, normalmente debido a su geología karstica, estos valores se mantienen relativamente constantes en el río y son de gran importancia para el mantenimiento de la fauna (Baeza y García de Jalón, 1997). Por esta razón es importante que en ríos con cuencas de estas características, Guadiela, Tajo y Tajuña se tomen unas medidas de gestión adecuadas para que estos valores no se modifiquen en exceso, y se mantengan unos caudales mínimos suficientemente altos como para que sean comparables a aquellos a los que están adaptados las especies que viven en esos sistemas fluviales con esas características particulares en sus estiajes.

Otro factor muy relevante en los tramos medios y altos de nuestros ríos es la regulación para saltos hidroeléctricos. En el caso de las estaciones tomadas en los ríos Tajo y Guadiela los eventos extremos han aumentado su frecuencia, refiriéndonos a los caudales máximos. Ambos cuentan con numerosas presas destinadas a la producción eléctrica, sometiendo la apertura de compuertas a las necesidades de abastecimiento de la red. El caso más contrastable ha sido el del río Guadiela en Entrepeñas (de 4 pasa a 17 días sobre el percentil 90), que también tiene un claro aumento en la frecuencia de mínimos valorada a través de la variable NQ10%, pasando de 1 a 9 días por debajo del 10% del módulo. Teniendo en cuenta que las fluctuaciones frecuentes de caudal son una de las perturbaciones que más gravemente afectan a las poblaciones de peces (García de Jalón, 1987), se verían muy afectados las poblaciones endémicas (por ejemplo, *Salmo trutta fario* y *Barbus bocagei*) que se encuentran adaptadas a una gran regularidad en los caudales, por lo que los efectos sobre la fauna acuática se pueden predecir como muy graves a medio y largo plazo.

Dentro de las generalidades lógicas a las que se ven sometidos los ríos regulados, se observa que, la regulación de caudales supone siempre una disminución de la variabilidad de caudales, lo que se ha visto reflejado en la reducción del coeficiente de variación intranual en todos los ríos, también es muy lógico que se adelante el día de caudal mínimo ya que las presas cierran sus compuertas en los meses de la primavera, mientras acumulan agua, haciendo que sean estos días los que el río lleva muy poca o nada de agua, en vez de corresponder con el verano, que sería lo lógico. El río Sorbe es una excepción a estas dos regularidades en los efectos nocivos de las presas, ya que el día de caudal mínimo se mantiene y la Cvintra aumenta, esto es debido al modelo especial de regulación al que se ven sometidos sus embalses, ya que el agua de este río tiene la función primordial de aumentar las garantías de los regadíos, en las vegas del río Jarama y el Henares, y la suelta de caudales depende de cómo esté de bien abastecido este servicio, siendo ajeno al comportamiento del propio río.

La estabilización de caudales puede modificar la preferencia de hábitat de las especies piscícolas beneficiando a las especies alóctonas que compiten con las pertenecientes a nuestra fauna, mucho mejor adaptadas a las condiciones cambiantes frecuentes en nuestros ríos. O también a los invertebrados que forman parte de su alimento favoreciendo el establecimiento de especies que prefieren un tipo de hábitat más regular. Esto ocasiona un grave

problema de sustitución biológica en nuestros ríos y en muchos casos pérdida de biodiversidad (Irvine et al, 1987 y Aadland, 1993).

Hemos observado diferentes efectos en los hidrogramas naturales de los ríos estudiados, que en algunos casos se salen de los valores de fluctuación naturales (figura 2), que son debidas a la irregularidad natural y clásica de los ríos del centro peninsular; estas perturbaciones no naturales son muy llamativas en muchos casos, y se deben al sistema de gestión específico de las presas que obstaculizan el discurrir natural de estos ríos, en los que de forma sistemática se atiende a una visión mercantilista y dónde se tiene poca consideración de los efectos que producen estas alteraciones sobre los ecosistemas.

Los efectos reguladores de las presas unidos a una política irresponsable de introducción de especies, ha puesto en peligro a los grupos biológicos más especialistas que estaban adaptadas a la presencia periódica de esos caudales y su variación (Ward y Stanford, 1979). Como consecuencia se disminuye la biodiversidad del sistema y produce que las especies adaptadas a estos, se encuentren en algunos casos en riesgo de extinción (Camargo y García de Jalón, 1990).

REFERENCIAS

- Aadland, L.P. (1993). Stream Habitat Types: Their Fish Assemblages and Relationship to Flow. *N.A.J. of Fisheries Management* 13: 790-806.
- Allan, J.D. (1995). Freshwater failures: Structure and Function of Running Waters. *World Watch.*, 8: 27-35.
- Baeza y García de Jalón, (1997). Caracterización del régimen de caudales en ríos de la cuenca del Tajo basado en criterios biológicos. *Limnetica* 13 (1): 69-78.
- Brotons, P.A. (1988). Condicionamientos hidráulicos sobre la microdistribución en densidad de las poblaciones de macroinvertebrados de bentos. Estudio en un tramo del río Jarama (Madrid). Proyecto fin de carrera. E.T.S. de Ingenieros de Montes. Madrid.
- Camargo, L.A. y García de Jalón, D. (1990). The downstream impacts of the Burgomillodo Reservoir, Spain. *Regulated Rivers*. 5: 305-317
- CEDEX. (1997). Anuario de aforos de la Cuenca del Tajo. Centro de estudios y experimentación de obras públicas. CEDEX. Ministerio de Fomento.
- Estevan, A. (2000). Plan hidrológico: algunos ganan casi todos pierden. *Ecologista* 23: 16-17.
- García de Jalón, D. (1987). River regulation in Spain. *Regulated Rivers: Research and Management*, vol. 1: 343-348.
- Goudie, A. (2000). *The Human Impact on the Natural Environment* (5th Edition). The MIT Press. Massachusetts, EE.UU. 527 pp.
- Irvine, J.R., I.G. Jowett, y D.Scott. (1987). A test of the instream flow incremental methodology for underyearling rainbow trout, *Salmo gairdnerii*, in experimental New Zealand streams. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 21: 35-40.
- Jowett, I.G. y J.R. Richardson (1989). Effects of a severe flood on instream habitat and trout populations in seven New Zealand Rivers. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 23: 11-17.
- Lamouroux, N.; J. Olivier; H. Persat; M. Pouilly; Y. Souchon y B. Statzner (1999). Predicting community characteristics from habitat conditions: fluvial fish and hydraulics. *Freshwater Biology*, 42: 275-299.
- Martínez-Capel, F.; A. Giménez y D. García de Jalón (1999). Preferencias de microhábitat y condiciones hidráulicas para la boga (*Chondrostoma polylepis*) y el barbo (*Barbus bocagei*) en el alto Lozoya. Pp.: 219-226. En: *Primeros Encuentros científicos del Parque Natural de Peñalara y del Valle de El Páular*. Ed. Consejería de Medio Ambiente y Desarrollo Regional de la Comunidad de Madrid.
- Mayo, M.; B. Gallego; D. García de Jalón y P.A. Brotons (1995). Preferencias de hábitat de la trucha común en la época de freza. Río Dulce, Guadalajara. *Limnética*, 11 (1): 49-54.
- Miller, A.J. (1990) Flood hidrology and geomorphic effectiveness in the central Appalachians. *Earth Surface Processes and Landforms* 15. 119-134.
- Ministerio de Medio Ambiente (1998). Libro Blanco del Agua en España.
- Molina, P. (1999). Los cauces y riberas en El Medio Ambiente en Madrid. Publica Ecologistas en Acción. 224 pags.
- Poff, N.L.; J.D. Allan; M.B. Bain; J.R. Karr; K.L. Prestegard; B.D. Richter; R.E. Sparks y J.C. Stromberg (1997). The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, vol. 47, nº11: 769-784.
- Richter, B.D.; V.B. Jeffrey; W. Robert y P.B. David (1997). How much water does a river need?. *Freshwater Biology*. 37: 231-249.
- Salveit, S.J.; T. Bremnes y O.R. Lindas (1995). Effects of sudden increases in discharge in a large river of newly emerged Atlantic Salmon (*Salmo salar*) and Brown trout (*Salmo trutta*) fry. *Ecology of Freshwater Fish*, 4: 126-136.
- Scott, M.L., Friedman, J.M., Auble, G.T. (1996). Fluvial processes and establishment of bottomland trees. *Geomorphology*. 14: 327-339.
- Ward, J.V. y Stanford, J.A. (Eds.) (1979). *The ecology of regulated streams*. Plenum Press. New York. 398 pags.
- Williams, J.G. (1996). Lost in space: minimum confidence intervals for idealized PHABSIM studies. *Transactions of the American Fisheries Society*, 125: 458-465.
- Wolman, M.G. y Miller, J.P. (1960). Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. *Journal of Hydrology* 69. 54-74.