

Alteración que presenta la temperatura del agua por la existencia de embalses

Rafael Val

Universidad Nacional Autónoma de México

Daniel Niñerola
Juan Pomares
José Dolz

Universidad Politécnica de Cataluña, España

Juan Armengol

Universidad de Barcelona, España

El agua de un río mantiene un intercambio de calor con la atmósfera y con el fondo. Este proceso puede alcanzar su equilibrio siempre y cuando las características geológicas y climáticas a lo largo de un tramo del río sean similares. Sin embargo, el comportamiento térmico del río puede ser alterado por los diversos usos del agua, como la refrigeración de centrales termoeléctricas, o por el almacenamiento del agua debido a la existencia de una presa. En el caso de las regiones con clima mediterráneo, donde se encuentran los embalses aquí estudiados, los efectos de las alteraciones en el régimen térmico, resultado a su vez de dichos embalses, provocan una tendencia a la constancia térmica estacional (elevación de las temperaturas invernales y disminución de las temperaturas estivales) y también un aumento de la uniformidad diaria. Aguas abajo de las termoeléctricas o presas, la temperatura del agua evoluciona de tal forma que tiende a lograr el equilibrio con el medio ambiente.

Palabras clave: alteración, río, temperatura, embalses, Mediterráneo, fluvial, régimen térmico, equilibrio térmico.

Introducción

Un embalse condiciona la temperatura del agua que circula por un tramo de río situado inmediatamente aguas abajo de la presa. Así, en un clima de tipo mediterráneo y en verano, frecuentemente a la salida del embalse, la temperatura del agua es significativamente inferior a la que tendría en esa misma zona de río de no existir el embalse. Por tanto, el agua del río presenta un desequilibrio térmico con su entorno (atmósfera y lecho) que, en su discurrir aguas abajo, se irá corrigiendo (el agua incrementará su temperatura). El objetivo principal de este trabajo es presentar de una forma sencilla cómo un embalse situado en zona de clima mediterráneo modifica el comportamiento térmico natural del río, espe-

cialmente en verano. Asimismo, se estudia la recuperación de ese comportamiento térmico aguas abajo del embalse. Todo ello directamente vinculado al sistema de embalses consecutivos Mequinenza-Ribarroja-Flix, situados en el tramo final del río Ebro, ver ilustración 1. Se compara la temperatura del agua a la entrada de los embalses con la que se tiene a la salida de éstos, así como su recuperación térmica conforme el río va avanzando aguas abajo de la presa, tratando de llegar a un equilibrio térmico con su entorno. Las estaciones de medición que se consideran aguas arriba son Escatrón, Fraga y Aitona, ver ilustración 1. Las estaciones que miden la temperatura del agua, aguas abajo de los embalses, son CH Flix, CN Ascó, Pas de L'Ase y Miravet, ver ilustración 1.

Ilustración 1. Localización de la zona de estudio. Aportaciones en régimen natural (Val, 2003).



Los resultados muestran que en verano, el agua que sale del sistema de embalses (a la salida del punto de medición en la CH Flix) es más fría que la que entra en ellos (en los puntos de medición Escatrón, Fraga y Aitona). En el invierno se presenta una situación contraria, el agua que sale de los embalses es más caliente que la que entra en ellos. Además, se observa que, debido a la refrigeración de la central nuclear de Ascó, la temperatura del agua del río aumenta hasta 3°C durante todo el año. El resultado es que, aguas abajo de la central nuclear Ascó, en verano, las alteraciones de la temperatura del agua que sale de los embalses y de la central nuclear Ascó aproximadamente se compensan entre sí; es decir, los embalses la enfrían y la central nuclear Ascó la calienta. En el invierno, en cambio, las alteraciones son del mismo orden y mismo signo (originando un aumento de la temperatura) y, por tanto, se suman. Para llevar a cabo el análisis de la influencia de los embalses en la temperatura del agua del río, este trabajo se divide en tres partes. En la primera parte se pone en evidencia la modificación del régimen diario de temperatura mediante mediciones realizadas cada minuto y guardando el promedio de diez minutos. Ello se realiza para días de verano y de invierno, nublados y sin nubes. De modo que se pone de manifiesto el diferente comportamiento según sea la época del año y la situación atmosférica. En segundo lugar se estudia la evolución anual de la temperatura del agua aguas arriba de los embalses comparándola con la temperatura del agua aguas abajo de los mismos. Ello se realiza utilizando el valor de la temperatura media semanal. Por último, se muestra la influencia de los embalses en la variabilidad diaria de la temperatura del agua.

Con este estudio se desarrolló un modelo de balance térmico que se aplicó a un tramo de 5.6 kilómetros sobre el río Ebro, entre las estaciones de CH Flix y CN Ascó, ya que se contaba tanto con información de caudales en el río y de temperatura del agua del río como de las variables meteorológicas que se requieren para llevar a cabo dicho balance térmico. Los resultados que se obtuvieron al realizar el balance térmico fueron satisfactorios y se darán a conocer ampliamente en otro trabajo. El impacto ecológico de los cambios provocados tanto en la temperatura del agua como en los caudales en el río, además de la retención de sólidos en suspensión en los embalses, es motivo de un estudio a fondo en una tesis doctoral que está llevando a cabo la Universidad Politécnica de Cataluña en esa misma zona de grandes embalses. Los resultados serán presentados en cuanto se haya llevado a cabo el examen.

Fenómeno objeto de estudio

El agua de un río intercambia calor con su entorno: la atmósfera y el lecho. Este proceso puede alcanzar el equilibrio, de manera que el calor cedido por el agua sea igual al absorbido. Si las características físicas y climáticas del entorno son similares a lo largo de un tramo de río, el equilibrio antes citado da lugar a que, en un instante dado, la temperatura del agua sea similar en todo el tramo. Normalmente, a lo largo de un río en estado natural, la temperatura aumenta a medida que disminuye la altitud. A esta variación espacial se superpone una doble variación temporal, ya que en una sección dada del río, la temperatura varía según un ciclo diario y otro anual. El comportamiento térmico de un río, tal como anteriormente se ha descrito, puede ser profundamente alterado por circunstancias no naturales como son los vertidos térmicos procedentes de la refrigeración de una central térmica o la presencia de un embalse.

Aguas abajo de una presa, la temperatura del agua sufrirá una evolución tendiente a recuperar el equilibrio térmico con su entorno (en este trabajo se presenta el estudio de las características de dicha evolución.) El régimen térmico de un río condiciona en gran medida los procesos químicos y biológicos que en él tienen lugar, por ejemplo: la alteración de la temperatura y de su evolución temporal (ciclos diarios y anuales) afecta a los organismos acuáticos, pues modifica su metabolismo, reproducción, comportamientos y fuentes de alimentación, lo cual incide en sus poblaciones. García Jalón *et al.* (1988) sugieren que el descenso de la temperatura en verano, provocado por embalses hidroeléctricos, puede explicar la disminución de las poblaciones de trucha en el río Cinca, afluente del Ebro.

En un embalse no existe normalmente una temperatura constante para cualquier profundidad, como es (aproximadamente) el caso de un río. El constante movimiento de las partículas del agua en un río favorece una uniformidad térmica a lo largo de éste. Por otra parte, las grandes masas de agua, prácticamente en reposo, existentes en un embalse presentan una notable inercia térmica. La capacidad calórica y la conductividad térmica del agua impiden que los intercambios térmicos entre la atmósfera y el agua situada en la superficie modifiquen de una forma inmediata la temperatura en toda la profundidad.

Así, el ciclo diario de la temperatura en la superficie no se refleja a partir de cierta profundidad. Por el contrario, el ciclo anual sí suele afectar a la mayor parte de la masa de agua. El comportamiento térmico del embalse en un territorio de clima mediterráneo es diferente si éste recibe calor (primavera-verano) o cede calor (otoño-invierno); ver ilustración 2.

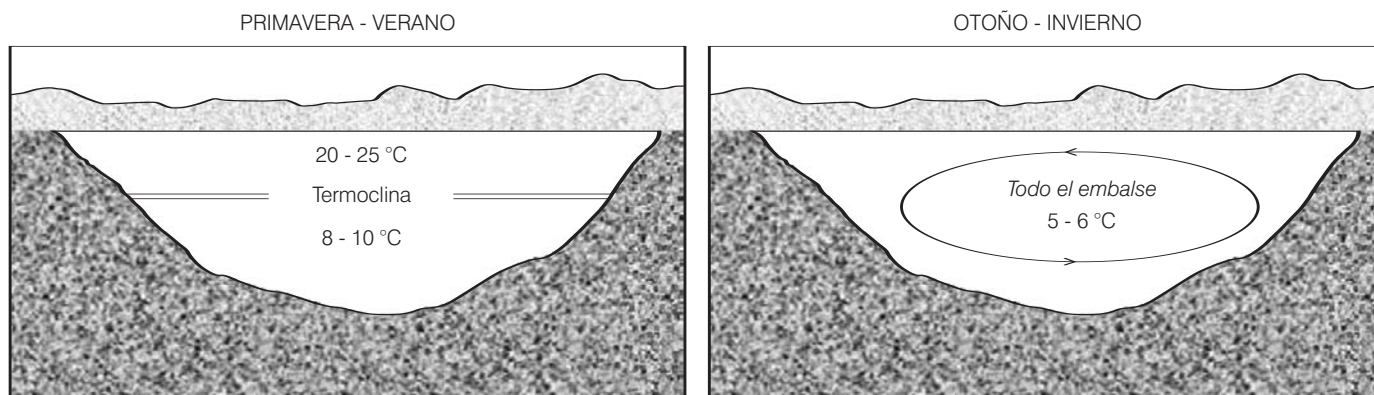
En el primer caso, el calor recibido en la superficie es transmitido a las zonas situadas a cotas inferiores y con menor temperatura. Dado que el agua aumenta su densidad al disminuir la temperatura (siempre que ésta sea superior a 4 °C), el gradiente de temperaturas da lugar a un gradiente estable de densidades (la densidad crece con la profundidad). Cuando el embalse cede calor a la atmósfera (otoño-invierno), el agua situada junto a la superficie se enfría, dando lugar a un gradiente inestable de densidades, lo que provoca un mezclado por convección y, por tanto, una uniformización de las temperaturas en profundidad.

La acción mecánica del viento sobre la superficie del embalse provoca el movimiento del agua, lo que tiende a uniformizar las temperaturas en una zona de embalse cercana a la superficie, aun en las épocas en que el resto del embalse se encuentra estratificado. Cuando el

embalse se encuentra estratificado (primavera-verano), la zona cercana a la superficie recibe el nombre de epilimnion. Cuando existe estratificación térmica, por debajo del epilimnion se sitúa una zona de fuertes gradientes térmicos llamada metalimnion o termoclina. Debajo de la termoclina existe una zona de pequeño gradiente térmico denominado hipolimnion. Durante el otoño, en la fase de enfriamiento, el embalse pierde su estratificación y se rompe la termoclina (ilustración 2). El comportamiento térmico de un embalse, anteriormente descrito, viene condicionado por muy diversos factores: tamaño y morfología del embalse (principalmente profundidad media), acción del viento y características climáticas de la zona, movimiento del agua en el embalse (que depende en gran medida del volumen del embalse, de los caudales de entrada y de los caudales de salida), temperatura del agua que entra en el embalse, cota a la que se extrae agua del embalse, etcétera.

La estratificación térmica de un embalse tiene consecuencias directas sobre la calidad del agua del río. Una primera consecuencia se refiere a la propia temperatura: aguas abajo de la presa, la temperatura del agua del río dependerá de la cota a que es extraída el agua del embalse. Normalmente, los desagües y las tomas de las turbinas se sitúan a cotas bajas y, por tanto, en la época en que el embalse está estratificado térmicamente, el agua del río inmediatamente aguas abajo estará a temperatura inferior a la que tendría de no existir el embalse. Además de modificar el valor de la temperatura, también se altera su evolución temporal en sus ciclos diarios y anuales, ya que el río y el embalse presentan diferentes respuestas a la variación de las condiciones climáticas. Esta distorsión térmica creada por la existencia de un embalse puede disminuirse en gran medida si se utilizan dispositivos que permitan seleccionar la cota a la que se extrae el agua.

Ilustración 2. Mezcla del agua en un embalse durante las diferentes épocas del año (Val, 2003).



La estratificación térmica condiciona en gran medida los procesos químicos y biológicos que tienen lugar en el embalse, lo que a su vez determina la calidad del agua del propio embalse y del río aguas abajo. La termoclina suele separar dos zonas de calidad muy diferentes: el epilimnion, con un alto contenido de oxígeno (arriba de la termoclina), y el hipolimnion, con bajo contenido de oxígeno (abajo de la termoclina). Lo anterior se debe a que la estabilidad del agua de la termoclina dificulta el reemplazar con oxígeno del epilimnion el oxígeno consumido en los procesos químicos y biológicos que tienen lugar en el hipolimnion. Un análisis detallado del comportamiento de los embalses y su incidencia en la calidad del agua puede verse, por ejemplo, en Smalley y Novak (1978), Cassidy (1989) y Petts (1984).

En la ilustración 3 se presenta la evolución anual (del 1/04/90 al 31/03/91) de la temperatura en el embalse de Mequinenza, en las proximidades de la presa. Se trata de la temperatura diaria (a las 8 am) en la superficie y junto a la toma de la central. Debido a la oscilación del nivel del embalse, a lo largo del periodo indicado, la diferencia de cotas entre la superficie y la toma de la central varió, aproximadamente, entre 30 y 40 metros. Observamos que existe una clara estratificación térmica durante la mayor parte del año; al inicio del verano se presenta una diferencia máxima de temperatura de unos 15 grados. También se observa que en algunos meses del invierno existe uniformidad de temperaturas. Cabe esperar que la temperatura en la superficie del embalse sea próxima a la que tendría el río de no existir aquél.

De todo lo anterior se desprende que, en verano, la temperatura del agua procedente del embalse de Me-

quinenza es más baja que la correspondiente al río, en equilibrio con las condiciones climáticas del entorno. Inmediatamente aguas abajo del embalse de Mequinenza, se encuentran los embalses de Ribarroja y Flix. Más adelante se verá que a la salida de la CH Flix, en verano, el agua presenta una temperatura inferior a la correspondiente a su equilibrio térmico con el entorno. Por tanto, al circular aguas abajo, el río Ebro incrementa su temperatura hasta llegar a ese equilibrio térmico.

Descripción de la zona en estudio

El río Ebro es uno de los ríos más importantes del Mediterráneo. Desemboca en forma de delta (ver ilustración 4). La longitud del río es de 910 kilómetros, el área de su cuenca corresponde a una extensión de 85,000 km². El área de riego es aproximadamente de 800,000 ha, la aportación anual media del Ebro al delta es de 11,700 hm³/año, y los consumos aguas arriba del delta son aproximadamente 5,500 hm³/año; por tanto, la aportación natural media al delta es cerca de 17,200 hm³/año (PHN, 2000). Los caudales en el delta están fuertemente condicionados por el sistema de embalses Mequinenza-Ribarroja-Flix, situado aproximadamente 80 kilómetros aguas arriba, ver ilustración 1. Estos embalses de carácter hidroeléctrico tienen una capacidad total de unos 1,750 hm³. Aguas abajo de ellos, el Ebro no recibe aportaciones significativas. Los caudales presentan una acusada variabilidad a lo largo del día, de tal forma que ello incide en la ecología del río y, en particular, da lugar a problemas de estabilidad en sus márgenes debido a la retención de sólidos en suspensión.

Las características propias del clima mediterráneo están en una transición entre los climas templados y los tropicales; por el régimen estacional de temperaturas se parecen a los primeros, mientras que por la aridez y la escasez de lluvias presentan semejanzas con los climas tropicales secos. Esta dualidad climática se refleja en la hidrología; en particular, los ríos que pasan por regiones con este tipo de clima ven influido su régimen de temperaturas. En la franja costera, el mes más cálido es agosto, mientras que, hacia el interior, es julio. Enero es el mes más frío y a partir de este mes, las temperaturas van ascendiendo lentamente, para descender de un modo brusco a partir de septiembre y de manera más lenta en diciembre y enero (Segura, 1990).

La zona que aquí se estudia se encuentra en un clima de tipo mediterráneo y comprende desde la salida de la central hidroeléctrica de Flix (CH Flix) hasta 33.9 kilómetros aguas abajo, donde se encuentra la población de Miravet, que se asienta en la margen derecha del río Ebro (ver ilustración 1). El río tiene un importante núcleo

Ilustración 3. Evolución anual de las temperaturas en el embalse de Mequinenza (Dolz et al., 1995).

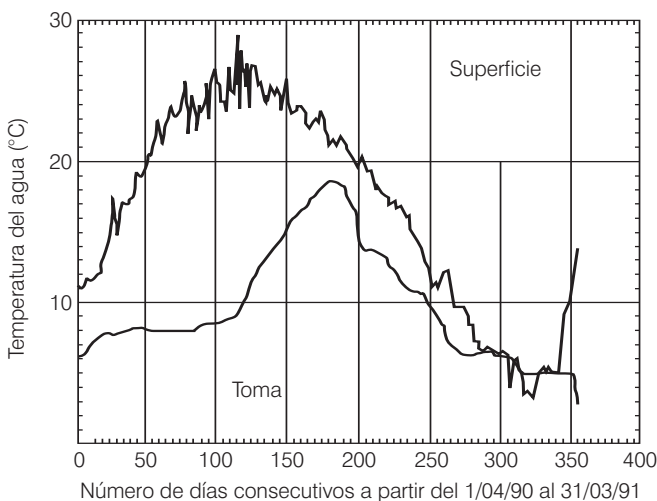


Ilustración 4. Localización del río Ebro en España y la zona de estudio en su cuenca (Val, 2003).



de regulación exactamente en la zona aguas arriba del sitio en estudio; así, si bien la central hidroeléctrica de Flix cuenta con una reducida capacidad de embalse (del orden de 11 hm³), inmediatamente aguas arriba se encuentra la central hidroeléctrica de Ribarroja, con una capacidad de embalse de 210 hm³ y en su cola se

encuentra el embalse de la central hidroeléctrica de Mequinenza, con 1,534 hm³ de capacidad y verdadero centro de regulación del tramo bajo del río Ebro (ver ilustración 1). La media anual de la aportación (río Ebro más río Segre y río Cinca) en la central hidroeléctrica de Ribarroja es de más de 11,000 hm³. Teniendo en cuenta

los volúmenes de embalse y las aportaciones, se observa que el tiempo de residencia medio del agua será prácticamente despreciable en Flix con respecto a Mequinenza y a Ribarroja.

En la actualidad, el mínimo caudal circulante aguas abajo de la central hidroeléctrica de Flix está fijado por las necesidades de refrigeración de la central nuclear Ascó (CN Ascó), con 77.3 m³/s de concesión, y por la alimentación de los dos canales de riego aguas abajo de Miravet (50 m³/s de capacidad total y que están en funcionamiento entre marzo y diciembre). Existe una probabilidad del 50% de que el caudal medio diario, en un día cualquiera del año, sea igual o superior a 320 m³/s, mientras que si sólo se consideran los días de verano, el caudal correspondiente a dicha probabilidad del 50% es de 250 m³/s (Dolz et al., 1997).

Red de medida en campo

Descripción general

Para llevar a cabo este estudio se cuenta con una serie de sensores de presión (para medir nivel en el río) y de temperatura del agua en tres puntos a la entrada de los embalses: un primer punto sobre el río Ebro en la estación de Escatrón (a la entrada del embalse de Mequinenza), el segundo punto es en la estación de Aitona, en el río Segre, y por último en el río Cinca, en la estación de Fraga (estos dos son aportación al embalse de Ribarroja, ver ilustración 1). También se tiene instrumentada la salida de los embalses, inmediatamente aguas abajo de las centrales hidroeléctricas de Mequinenza, Ribarroja y Flix. Para contar con la información que corresponde a la recuperación térmica del río Ebro aguas abajo de los embalses, se instaló el primer punto de muestreo, al lado de la central nuclear de Ascó (antes de la toma de agua para la refrigeración y a 5.3 km de la CH Flix); un segundo punto, aguas abajo de los embalses, a 6.6 kilómetros aguas abajo de la CN Ascó, en la estación de Pas de L'Ase (aquí únicamente se tiene medición de temperatura), y, por último, la estación de Miravet, que está situada a 22 kilómetros aguas abajo de Pas de L'Ase.

Instalación de la instrumentación

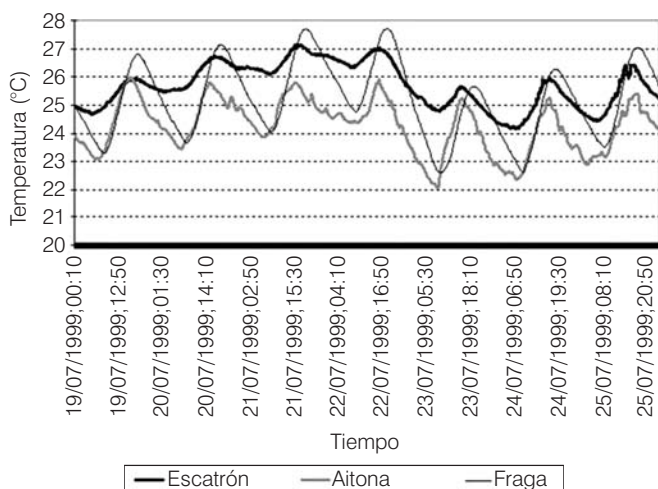
Los sensores se encuentran colocados en la margen del río o bien aguas abajo de la presa, a la salida de las turbinas; dichos sensores están dentro de un tubo de PVC de nueve metros de longitud y sujetos a una pared por medio de bridas, de tal forma que lo sostienen verticalmente. En la parte que está sumergida en el agua, el tubo está perforado a lo largo de un metro y medio por

donde circula el agua, sin que ésta llegue a quedar estancada y se alteren las mediciones; los agujeros están intercalados de tal forma que no le restan resistencia al tubo. Dichas perforaciones se realizan con la finalidad de proteger tanto al sensor de presión, que reporta el nivel del río, como al sensor de temperatura del agua; de tal forma que se resguardan de las acciones de una avenida o bien de los mismos peces que llegan a morder los cables.

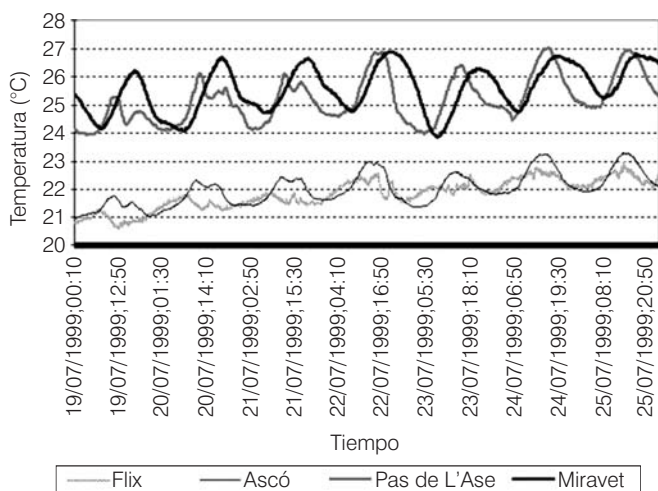
Además de los sensores de presión y de temperatura del agua, se instalaron tres estaciones meteorológicas en los puntos de Escatrón, Ribarroja y Miravet. En ellas se midieron los parámetros siguientes: temperatura ambiente, radiación solar incidente de onda corta, radiación neta de onda corta y larga, humedad relativa, velocidad del viento, dirección del viento, pluviometría. Las estaciones meteorológicas se encuentran colocadas al lado del río, en una explanada elevada, donde las mediciones de radiación no se ven afectadas por alguna sombra ni hay desviación u obstrucción del viento por algún cuerpo cercano.

La medición de temperatura del agua se efectúa utilizando una sonda resistiva pt100, la precisión utilizadas es de ± 0.1 °C. El nivel del agua se mide a través de un sensor de presión de tipo piezorresistivo, con una precisión del 1.0% entre -10 °C y $+50$ °C. La radiación solar global incidente de onda corta se mide con un sensor de tipo piranómetro, con una longitud de onda de entre 0.35 y 1.1 μm , con errores que están siempre dentro del 5% y, por lo general, son menores a 3%. Los datos de radiación neta se toman con un radiómetro neto; el espectro de respuesta del sensor es de 0.25 a 60 μm , con un error estimado por debajo del 2%. Para la temperatura ambiente, se garantiza una exactitud de ± 0.4 °C, dentro de un rango de -33 °C a $+48$ °C. El sensor de humedad relativa (RH) cuenta con un rango de medida de 0% a 100% RH, la exactitud es de $\pm 1.0\%$ RH. El monitor de viento mide tanto la velocidad del viento horizontal como la dirección. La exactitud de la velocidad del viento es de ± 0.3 m/s a 60 m/s, la máxima velocidad es de 60 m/s (130 mph) con ráfagas de viento de 100 m/s (220 mph). La dirección del viento tiene un error de 3°, el rango es de 360° mecánicamente y 355° electrónicamente. La pluviometría se mide con un pluviómetro de balancín, de modo que cada vuelco corresponde a 0.2 mm de lluvia, el error es del orden de 4.0%. Todos los sensores antes descritos van conectados a un *data-logger* totalmente programable. Se toman los datos de medición en los sensores tanto de nivel como de temperatura y de las estaciones meteorológicas cada minuto para después realizar un promedio cada diez minutos, los cuales se guardan en el *data-*

Ilustración 5. Temperatura del agua en las estaciones de medición para el caso de días de verano sin nubes.



Estaciones aguas arriba de los embalses (19/julio/99 - 25/julio/99)



Estaciones aguas abajo de los embalses (19/julio/99 - 25/julio/99)

logger. Para el caso del pluviómetro, el *data-logger* revisa cada segundo si el circuito está cerrado y, si es así, guarda la información, con lo cual sólo puede leer 0.2 mm cada segundo, es decir 720 mm/hr. La información se recibía en la universidad vía un módem telefónico, conectado al *data-logger*; esto hace posible recibir la información en tiempo real.

Modificación del régimen de temperaturas

Evolución diaria de las temperaturas

En la ilustración 5 se analiza la evolución de la temperatura del agua con un promedio de diez minutos tanto

aguas arriba como aguas abajo de los embalses; para días de verano, del 19 al 25 de julio de 1999, sin nubes. Aguas arriba (en las estaciones de Escatrón, Aitona y Fraga), la temperatura presenta una marcada variación cíclica diaria, muy marcada en la estación de Fraga (sobre el río Cinca) y notablemente inferior en la estación de Escatrón (sobre el río Ebro). Ello se debe a que los tirantes son menores en el río Cinca, respecto a los del río Ebro y, por tanto, presentan mayor sensibilidad en su régimen de temperaturas a la variación de la situación térmica que se da en la atmósfera.

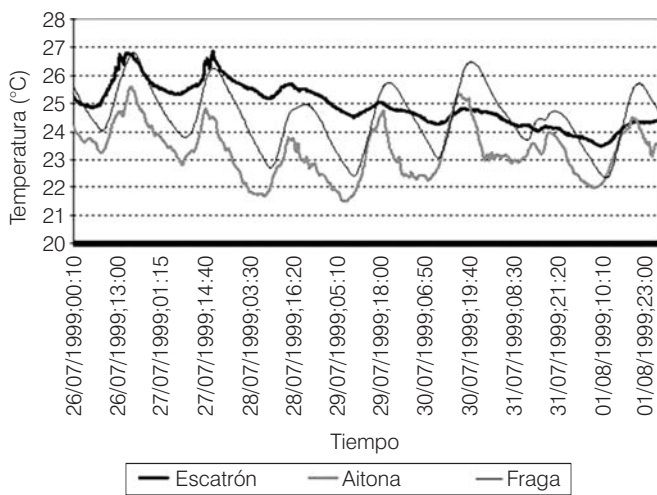
En la ilustración 5 se observa que a la salida de los embalses (estación de CH Flix), el río Ebro, en verano, presenta temperaturas inferiores a las que tiene a la entrada (estación de Escatrón), así como una acusada disminución en la variación cíclica diaria. Ambos cambios son debidos al comportamiento térmico de los embalses y a los criterios de explotación de los mismos.

También puede observarse en la ilustración 5, cómo aguas abajo de CH Flix (en las estaciones de CN Ascó, Pas de L'Ase y Miravet), el agua tiende a recuperar su comportamiento cíclico diario. Comparando la estación de CH Flix con la de CN Ascó, se constata que el agua tiende a incrementar su temperatura (Val *et al.*, 1998). Cabe indicar que el aumento de temperatura que tiene lugar entre la estación de CN Ascó y la de Pas de L'Ase es debido a la recuperación del régimen térmico natural y, sobre todo, a la descarga de calor procedente de la refrigeración de la CN Ascó. Se observa que en la estación de Miravet, situada más aguas abajo de la estación de Pas de L'Ase, las temperaturas son semejantes a las correspondientes aguas arriba de los embalses (estación de Escatrón); por tanto, ha recuperado el equilibrio térmico con su entorno.

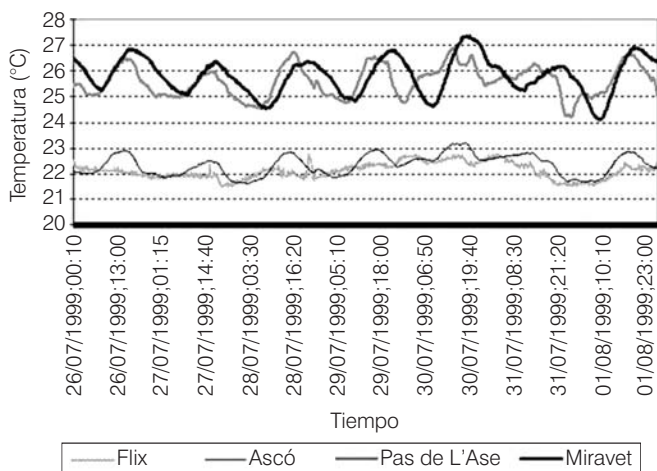
En la ilustración 6 puede observarse la evolución de la temperatura del agua; el promedio es de cada diez minutos, para días de verano con nubes. Esto implica una menor aportación de calor desde la atmósfera. Al comparar con la ilustración 5 se ve, como era de esperarse, que ello repercute en una menor variabilidad diaria de la temperatura en las estaciones aguas arriba de los embalses (sobre todo en Escatrón) y también en una recuperación más lenta del comportamiento cíclico diario aguas abajo de los embalses. Esto es evidente al comparar la evolución de temperaturas en la estación de CN Ascó mostradas en las ilustraciones 5 y 6.

En la ilustración 7 es posible observar el comportamiento de la temperatura del agua para la época de invierno sin nubes. La forma cíclica diaria está muy marcada en la estación de Fraga, menos en la de Aitona y mínimamente en la de Escatrón. Se ve también que la temperatura del agua en la estación de Escatrón es

Ilustración 6. Temperatura del agua en las estaciones de medición para el caso de días de verano con nubes.



Estaciones aguas arriba de los embalses (26/julio/99 - 01/agosto/99)



Estaciones aguas abajo de los embalses (26/julio/99 - 01/agosto/99)

mayor que la de Aitona y Fraga; sin embargo, están por debajo de las temperaturas que se tienen en los puntos de medición aguas abajo de los embalses. Por tanto, se ve que en invierno el efecto de los embalses es contrario al que tiene lugar en verano; en invierno, los embalses provocan un calentamiento del agua del río. También puede observarse un comportamiento cíclico diario en la estación de CH Flix más regular que en verano; aunque con menos variación de la temperatura diaria.

En la ilustración 8 se analizan días de invierno, pero ahora con nubes. Al comparar la ilustración 8 con la ilustración 7, se observa, como era previsible, una reducción en la variabilidad diaria. Si se analizan en conjunto tres variables (ver ilustración 9): temperatura del agua,

Ilustración 7. Temperatura del agua aguas arriba y aguas abajo de los embalses para días de invierno sin nubes (17/enero/00 – 23/enero/00).

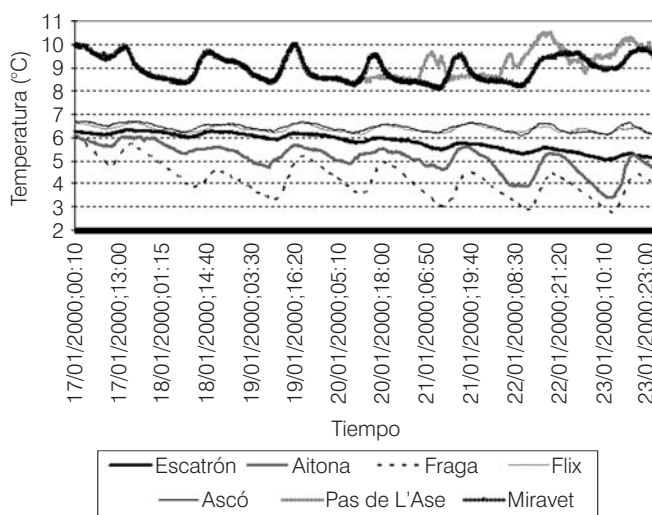
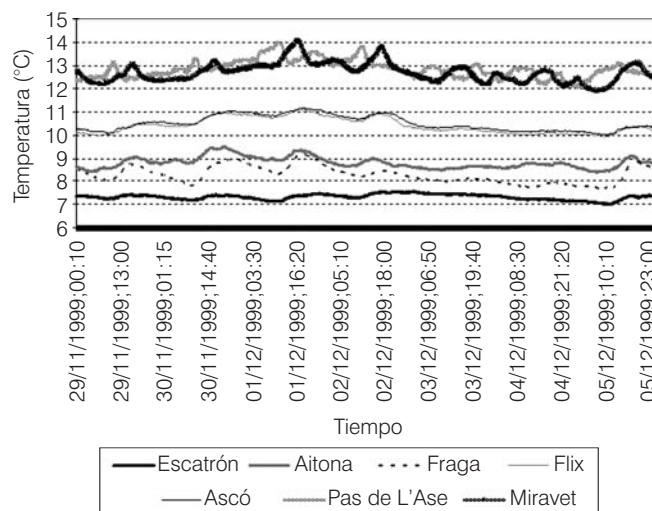


Ilustración 8. Temperatura del agua aguas arriba y aguas abajo de los embalses para días de invierno con nubes (29/noviembre/99 – 05/diciembre/99).



temperatura del aire y radiación solar incidente de onda corta, se puede observar que la temperatura máxima del aire se da después de que la radiación solar alcanza su máximo, y la temperatura máxima del agua se alcanza después de los otros dos máximos. Por tanto, el máximo calentamiento en el agua se dará horas después de la máxima radiación solar incidente de onda corta y de la máxima temperatura del aire, ello debido a que el agua presenta una mayor inercia térmica.

Ilustración 9. Estación de Miravet, días de verano sin nubes (19/julio/99 – 23/julio/99).

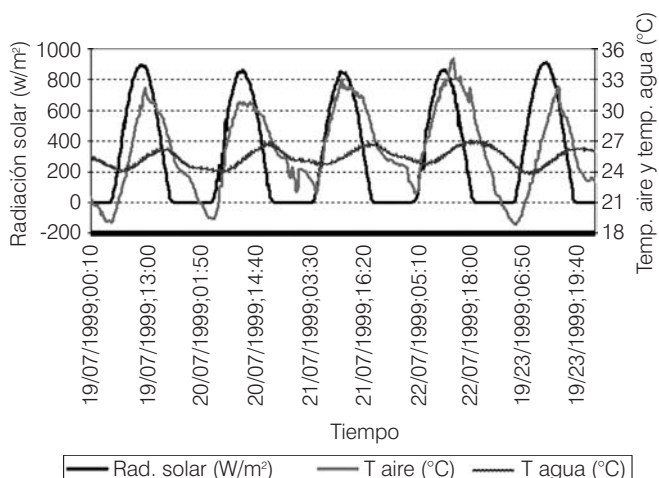
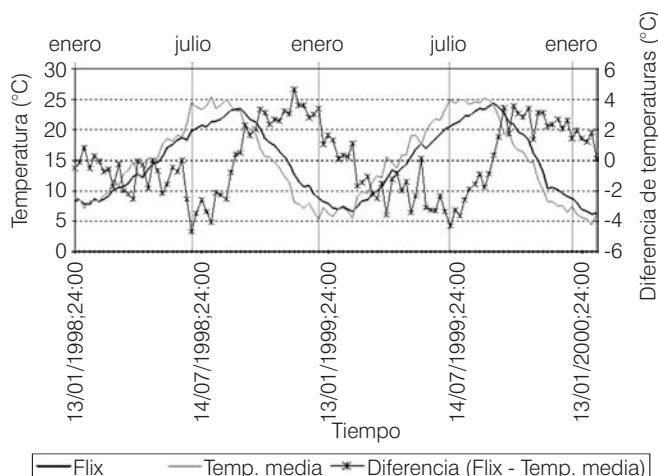


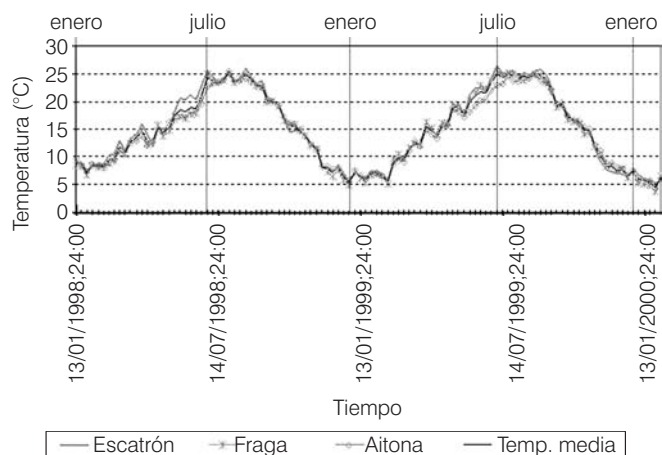
Ilustración 11. Temperatura del agua a la salida de los embalses, temperatura media del agua a la entrada de los embalses y la diferencia de las temperaturas anteriores. Todas las temperaturas se refieren a la media semanal de la temperatura del agua (13/enero/1998 – 31/enero/2000).



Evolución anual de las temperaturas

En este apartado se analiza la evolución anual de la temperatura del agua aguas arriba y aguas abajo de los embalses, utilizando el valor de la temperatura media a lo largo de cada semana (de lunes a domingo), es decir, una temperatura media semanal. Se dispone del siguiente banco de datos para trabajar: para las estaciones aguas arriba –en Escatrón, Fraga y Aitona–, el periodo va del 13 de enero de 1998 al 31 de diciembre de 1999. El periodo para las estaciones aguas abajo –en CH Flix, CN Ascó, Pas de L’Ase y Miravet– es del 13 de enero de 1998 al 31 de diciembre del 2000.

Ilustración 10. Temperatura semanal media del agua en las estaciones aguas arriba de los embalses y valor medio de las tres estaciones aguas arriba de los embalses (13/enero/1998 – 31/enero/2000).



En la ilustración 10 puede observarse la temperatura media semanal del agua en las tres estaciones aguas arriba de los embalses (estaciones Escatrón, Fraga y Aitona) y la temperatura media de la temperatura media semanal de estas tres estaciones. Se puede apreciar que, en general, las tres curvas de temperaturas se asemejan. Las máximas temperaturas se dan durante los meses de julio y agosto, y las mínimas de enero a febrero. Se tomará la media de la temperatura media semanal de las tres estaciones –Escatrón, Fraga y Aitona– como representativa de la temperatura del agua a la entrada de los embalses y se usará para hacer las comparaciones con las estaciones de aguas abajo.

En la ilustración 11 se compara la temperatura media de la temperatura media semanal a la entrada de los embalses con la temperatura media semanal del agua a la salida de éstos, en la estación de CH Flix; se observa que hay una alteración en el comportamiento térmico del río. Durante el verano, la temperatura media semanal del agua en la estación de CH Flix es inferior a la temperatura media semanal a la entrada, es decir, los embalses provocan que el agua se enfríe en esta época. Sin embargo, en invierno la temperatura media semanal es superior. La diferencia que hay de temperatura media semanal entre la salida y la entrada se mueve en un rango de ± 4 °C, como se puede ver en el eje derecho de la ilustración 11, y está muy bien marcado el comportamiento cíclico anual (Val, 2003).

En la ilustración 12 se representan las temperaturas medias semanales de la temperatura del agua aguas

Ilustración 12. Temperatura media semanal del agua aguas abajo de los embalses (13/enero/1998 – 31/diciembre/2000).

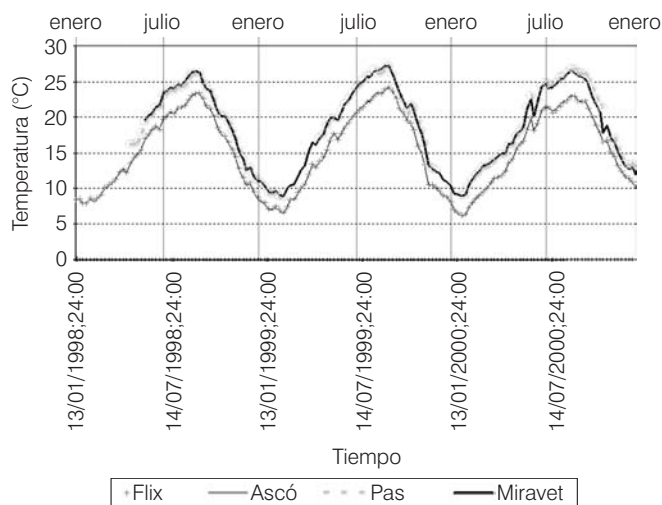
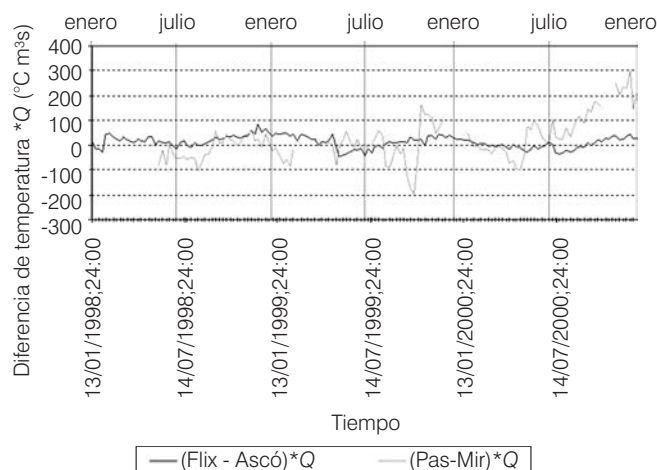


Ilustración 13. Diferencia de temperatura del agua por el caudal, por lo tanto es el almacenamiento de calor aguas abajo de los embalses. Valor en media semanal (13/enero/1998 – 31/diciembre/2000).



abajo de los embalses, estaciones CH Flix, CN Ascó, Pas de L’Ase y Miravet. Se observa claramente el efecto de la descarga térmica de la refrigeración de la CN Ascó que tiene lugar entre las estaciones de CN Ascó y Pas de L’Ase.

El almacenamiento de calor de una masa de agua que circula en un tramo de río es directamente proporcional al producto del caudal por el incremento de temperatura que sufre el agua a lo largo de dicho tramo. De tal forma que, si a la diferencia de temperaturas CH Flix – CN Ascó o Pas de L’Ase – Miravet la multiplicamos por el caudal, se obtienen las gráficas de la ilustración 13, donde se observa que este almacenamiento presenta una evolución anual muy regular entre las estaciones de CH Flix y CN Ascó, y es negativo en largos periodos invernales y positivo en cortos periodos de verano.

Cabe señalar que se está analizando la temperatura media semanal del almacenamiento de calor y no el calentamiento que se produce en las horas centrales del día (cuando el calentamiento del agua es máximo). Sin embargo, en el tramo entre las estaciones de Pas de L’Ase y la de Miravet, el almacenamiento de calor presenta un comportamiento mucho más irregular; probablemente motivado por el incremento de temperatura asociado a la descarga térmica de la refrigeración de la CN Ascó. La ausencia de datos visible en algunas zonas se debe a la carencia de información en alguno de los puntos.

Sinokrot y Gulliver (2000) señalan que la modelación de la temperatura del agua en el río de estudio resultó

ser más sensible a la variación en la medición de la radiación solar y la temperatura del aire. La causa del problema de esta alta sensibilidad en esos dos parámetros reside en la poca profundidad que tiene el río durante los periodos de caudales bajos. Los autores concluyen que existe una relación clara entre la temperatura del agua en el río y la relación del caudal que se tenga, por ello se requiere de un estudio que aborde la variabilidad diaria de la temperatura del agua del río.

Variabilidad diaria en la temperatura del agua

Para estudiar la variabilidad diaria en la temperatura del agua, es necesario obtener la diferencia de temperatura del agua entre la máxima y la mínima presentada a lo largo de un día; posteriormente se obtiene el promedio semanal de esas diferencias, ello tanto en las estaciones aguas arriba como en las estaciones aguas abajo de los embalses. Por tanto, denominaremos amplitud diaria de la temperatura del agua a la diferencia que hay entre la máxima y la mínima temperatura del agua en media de diez minutos a lo largo de un día en una sección del río. En la ilustración 14 se puede ver, para la estación de Escatrón, la evolución anual de la temperatura máxima del agua y la temperatura mínima diaria y de la amplitud diaria, todo ello en temperatura media semanal. Esta amplitud presenta un claro comportamiento cíclico anual; la máxima es en verano (aproximadamente 2 °C) y mínima en invierno (aproximadamente 0.3 °C), como se muestra en el eje derecho de la ilustración 14.

En la ilustración 15 se puede observar la amplitud de la temperatura del agua para las estaciones Escatrón, Fraga y Aitona, aguas arriba de los embalses. En la estación de Escatrón, la amplitud es menor que en las estaciones de Fraga y Aitona, ya que los tirantes son menores en el río Cinca (estación de Fraga) y en el río Segre (estación de Aitona) que los que presenta el río Ebro (en la estación de Escatrón). Se observa que es más pequeña la inercia en el río Ebro para seguir las fluctuaciones térmicas de la atmósfera.

En la ilustración 15 también se muestran las amplitudes de temperatura del agua para las estaciones que se encuentran aguas abajo de los embalses: las de CH Flix, CN Ascó, Pas de L'Ase y Miravet. En esta ilustración se pueden apreciar dos grupos, uno corresponde a las estaciones de CH Flix y CN Ascó, donde se observa una amplitud cuyo máximo llega a ser de 1.4 °C, pero en general se mueve entre 1 °C para el verano y 0.4 °C para el invierno. El otro grupo corresponde a las estaciones de Pas de L'Ase y Miravet, donde el rango de amplitud va de 1 °C a 2 °C, pudiendo llegar a los 2.5 °C en el verano (ver ilustración 15). En ambos grupos se da un claro comportamiento cíclico anual. Se observa cómo aguas abajo de los embalses, en la estación de CH Flix, la amplitud es claramente inferior a la de aguas arriba (sobre todo en verano). También se pone en evidencia que el río tiende a recuperar esa amplitud de la temperatura diaria al desplazarse aguas abajo, en las estaciones de Pas de L'Ase y Miravet.

Ilustración 14. Temperatura del agua tanto máximas como mínimas diarias, y la amplitud diaria de la temperatura del agua, para la estación de Escatrón. Valor en media semanal (13/enero/1998 – 31/enero/2000).

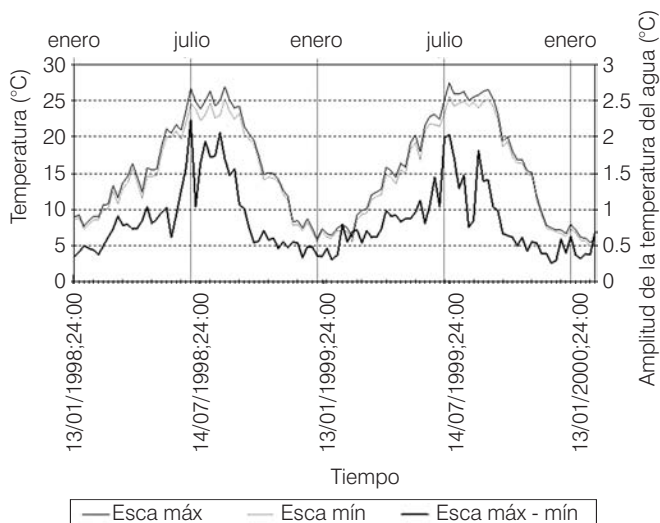
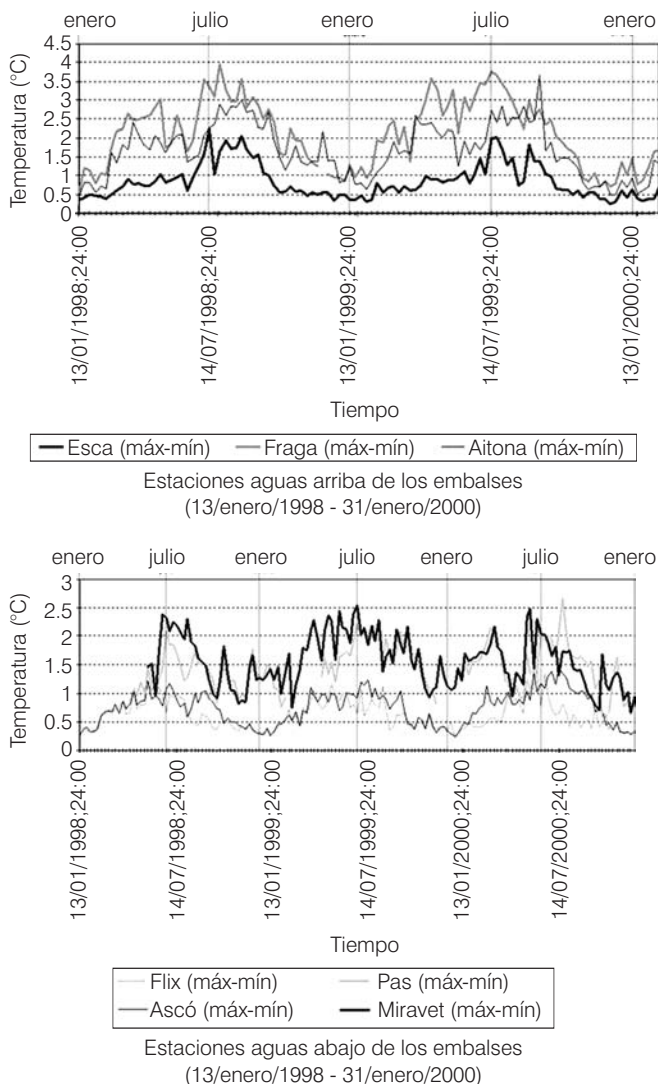


Ilustración 15. Amplitud de la temperatura diaria del agua. Valor en media semanal.



Conclusiones

La presencia del sistema de embalses Mequinzenza – Ribarroja – Flix modifica el comportamiento térmico del río Ebro. Ello se pone de manifiesto en la ilustración 5, donde se presenta la variación de la temperatura media en diez minutos para unos días de verano con fuerte radiación solar de onda corta (días sin nubes). Se observa que, aguas arriba de los embalses (estaciones de Escatrón, Aitona y Fraga), la temperatura presenta una marcada variación cíclica diaria, muy acusada en la estación de Fraga (río Cinca) y notablemente inferior en la estación de Escatrón (río Ebro). Ello puede justificarse por los menores calados que presenta el Cinca respec-

to al Ebro y, por tanto, la mayor sensibilidad de su régimen de temperaturas a la variación de la situación térmica existente en la atmósfera.

A la salida de los embalses (CH Flix), el río Ebro, en verano, presenta temperaturas inferiores a las que tiene a la entrada (Escatrón), así como una acusada disminución en la variación cíclica diaria. Ambos cambios son debidos al comportamiento térmico de los embalses y a los criterios de explotación de los mismos. También puede observarse cómo en las estaciones de CN Ascó, Pas de L'Ase y Miravet, aguas abajo de la estación de CH Flix, el agua tiende a recuperar su comportamiento cíclico diario. Comparando la estación de CH Flix con la de CN Ascó, se constata que el agua tiende a incrementar su temperatura. Cabe indicar que el aumento de temperatura que tiene lugar entre la estación de CN Ascó y la de Pas de L'Ase se debe a su recuperación del régimen térmico natural, así como a la descarga de calor procedente de la refrigeración de la CN Ascó.

Se observa que en la estación de medida situada más aguas abajo (estación de Miravet), las temperaturas son semejantes a las correspondientes aguas arriba de los embalses.

En la ilustración 7 se analiza la alteración de la temperatura provocada por los embalses en días de invierno sin nubes. La forma cíclica diaria está muy marcada en la estación de Fraga, menos en la de Aitona y mínimamente en la estación de Escatrón. Se ve también que la temperatura en la estación de Escatrón es mayor que la que se presenta en las estaciones de Aitona y Fraga; sin embargo, estas tres estaciones se encuentran por debajo de las temperaturas que se tienen en los puntos de medición aguas abajo de los embalses. Por tanto, se ve que en invierno el efecto de los embalses es contrario al que tiene lugar en verano: en invierno, los embalses provocan un calentamiento del agua del río. También puede observarse un comportamiento cíclico diario en la estación de CH Flix más regular que en verano, aunque con menos variación de la temperatura diaria.

En la ilustración 11 se compara la media de las temperaturas medias semanales en las tres estaciones de medida situadas a la entrada de los embalses (estaciones de Escatrón, Aitona y Fraga) con la temperatura media semanal a la salida, en la estación de CH Flix y se observa que, durante el verano, la temperatura del agua de la estación de CH Flix es inferior a la temperatura media a la entrada; es decir, los embalses provocan que el agua se enfríe en esta época. Sin embargo, en invierno la temperatura es superior. La diferencia que hay de temperatura entre la salida y la entrada se mueve en un rango de ± 4 °C, pero cabe señalar que está muy bien marcado el comportamiento cíclico anual.

Denominaremos amplitud diaria de temperatura en una sección de un río a la diferencia entre el máximo y el mínimo valor que presenta la temperatura media en diez minutos a lo largo de un día. En la ilustración 15 se presentan las medias semanales de las amplitudes diarias de temperatura aguas arriba de los embalses y aguas abajo de éstos.

Se puede observar que en la estación de Escatrón la amplitud es menor que en las estaciones de Fraga y Aitona, ya que son menores los tirantes del río Cinca (en la estación de Fraga) y del río Segre (en la estación de Aitona) que los del río Ebro (en la estación de Escatrón), lo que provoca que sea más pequeña la inercia del río para seguir las fluctuaciones térmicas de la atmósfera. En la ilustración 15 se pueden apreciar dos grupos: uno corresponde a las estaciones de CH Flix y CN Ascó, donde se tiene una amplitud que como máximo puede llegar a ser de 1.4 °C, pero en general se mueve entre 1 °C para el verano y de 0.4 °C en el invierno; el otro es el de las estaciones de Pas de L'Ase y Miravet, donde el rango de la amplitud va de 1 a 2 °C, pudiendo llegar hasta los 2.5 °C en los veranos. En ambos grupos se da un claro comportamiento cíclico anual. Se observa cómo aguas abajo de los embalses, en la estación de CH Flix, la amplitud es claramente inferior a la correspondiente aguas arriba (sobre todo en verano). También se pone en evidencia que el río tiende a recuperar esa amplitud de la temperatura diaria al desplazarse aguas abajo, de acuerdo con lo observado en las estaciones de Pas de L'Ase y Miravet.

Agradecimientos

El trabajo contó con el financiamiento de los proyectos de investigación HID1999-0599-C02-02 y HID2001-2185-C02-01 del Programa de Recursos Naturales del Plan Nacional de Investigación y Desarrollo. También se tuvo el apoyo y patrocinio de ENDESA, de la Asociación Nuclear de Ascó y de la Agencia Catalana de l'Aigua de la Generalitat de Catalunya. A todos ellos se agradece su cooperación en la realización de este trabajo. A la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI), que durante cuatro años brindó la beca para llevar a cabo este proyecto. A la Universidad Politécnica de Cataluña y al Instituto de Ingeniería por la ayuda económica para concluir este estudio.

Recibido: 05/11/2004
Aprobado: 21/04/2005

Referencias

CASSIDY, R.A. Water temperature, dissolved oxygen and turbidity control in reservoir releases. Incluido en *Alternatives in regulated river management*. Ed. J.A. Gore, G.E. Petts. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1989.

- DOLZ, J., PUERTAS, J., AGUADO, A y AGULLÓ, L. *Efectos térmicos en presas y embalses*. Barcelona: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. E.T.S.I Caminos, canales y Puertos, Universidad Politécnica de Cataluña, 1995.
- DOLZ, J., GÓMEZ, M. y NIETO, J. El Ebro en el Delta. *Revista de Obras Públicas*. Órgano profesional de los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Año 144, núm. 3368, septiembre, 1997, pp.7-14.
- GARCIA JALÓN, D., MONTES, C., BARCELÓ, E., CASADO, C. y MENES F. Effects of hydroelectric scheme on fluvial ecosystems within the Spanish Pyrenees regulated rivers. *Research and Management*. Núm. 4, 1988, pp. 479-491.
- PETTS, G. E. *Impounded rivers*. Nueva York: Wiley. 1984.
- PHN. Plan Hidrológico Nacional. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, 2000.
- SEGURA, F.S.B. *Las Ramblas valencianas. Algunos aspectos de hidrología, geomorfología y sedimentología*. Valencia, España: Universitat de Valencia, Secció de Geografia. 1990.
- SINOKROT, B.A. y GULLIVER, J.S. In-stream flow on river water temperatures. *ASCE Journal of Hydraulic Research*. Vol. 38, núm. 5, 2000, pp. 339-349.
- SMALLEY, D.H. y NOVAK, J.K. Natural thermal phenomena associated with reservoirs. Incluido en *Environmental effect of large dams*. Nueva York: ASCE. 1978.
- VAL, R., NIÑEROLA, D., POMARES, J. y DOLZ, J. Incidencia de los embalses en el comportamiento térmico de un río. Caso del río Ebro, España. *Memorias del XVIII Congreso de la División Latinoamericana del IAHR*. Oaxaca, México. Octubre 1998, pp. 451-463.
- VAL, R. *Incidencia de los embalses en el comportamiento térmico del río Ebro. Caso del sistema de embalses Mequinenza-Ribarroja-Flix en el río Ebro*. Barcelona: Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Universidad Politécnica de Cataluña. 2003, 196 pp. (Tesis doctoral).

Abstract

VAL, R., NIÑEROLA, D., POMARES, J., DOLZ, J. & ARMENGOL, J. *Changes in water temperature caused by dams. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XXI, no. 1, January-March, 2006, pp. 59-72.*

The water of a river exchanges heat with the atmosphere and with the riverbed; this process can reach its equilibrium along a stretch of river with similar geologic and climatic characteristics. This behavior can be modified by artificial effects; for example the use of the river water as a cooler in thermal power stations or in reservoir existent. The case of regions with Mediterranean climate, where the reservoir is meeting and it is studying here, the effects of changes of natural thermal regime caused by dams and reservoirs are evaluated through: seasonal and daily thermal constancies, warmer winter water temperatures and reduced summer water temperature. Downstream from the power station or downstream the dam, the water temperature will evolve in such a way as to achieve the environmental equilibrium. The water temperature is a main factor in the ecology of the river, already it conditions in importance the life in fluvials reservoirs.

Keywords: alteration, river, temperature, dams, the Mediterranean, fluvial, thermal regime, heat balance.

Dirección institucional de los autores:

Dr. Rafael Val

Doctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos,
Investigador, Instituto de Ingeniería, Coordinación de
Hidráulica,
Universidad Nacional Autónoma de México,
Av. Universidad #3000, Circuito Escolar, Ciudad Universitaria,
C.P. 04510, México D.F., México,
teléfono: 5623 3600, extensión 8623, fax: 5616 2798,
rvals@iingen.unam.mx

Ing. Daniel Niñerola

Ingeniero Técnico Telecomunicaciones,
Profesor. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y
Ambiental,
Grupo de investigación FLUMEN,
Universidad Politécnica de Cataluña,
C/ Jordi Girona, 1- 3, C.P. 08034, Barcelona, España,
teléfono: 93401 6470, fax: 93401 7357,
daniel.ninyerola@upc.edu

Ing. Juan Pomares

Ingeniero Técnico de Obras Públicas,
Coordinador de Laboratorios, Departamento de Ingeniería

Hidráulica, Marítima y Ambiental,
Grupo de investigación FLUMEN,
Universidad Politécnica de Cataluña,
C/ Jordi Girona, 1- 3, C.P. 08034, Barcelona, España,
teléfono: 93401 6470, fax: 93401 7357,
juan.pomares@upc.edu

Dr. José Dolz

Doctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos,
Catedrático, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y
Ambiental,
Grupo de investigación FLUMEN,
Universidad Politécnica de Cataluña,
C/ Jordi Girona, 1- 3, C.P. 08034, Barcelona, España,
teléfono: 93401 6470, fax: 93401 7357,
j.dolz@upc.edu

Dr. Juan Armengol

Doctor en Limnología,
Catedrático, Departamento de Ecología, Facultad de Biología,
Grupo de investigación FLUMEN,
Universidad de Barcelona,
Av. Diagonal, 645, C.P. 08028, Barcelona, España,
teléfono: 93402 1513, fax: 93411 1438,
armengol@porthos.bio.ub.es