

## **RESUMEN Y CONCLUSIONES**



## 1.- OBJETIVOS DE LA TESIS.

Un embalse condiciona la temperatura del agua que circula por el tramo del río situado inmediatamente aguas abajo de la presa. Así, en clima mediterráneo y en verano, frecuentemente a la salida del embalse la temperatura es significativamente inferior a la que existiría en esa misma zona de río en el supuesto de que no hubiera embalse. Por tanto, el agua del río presenta un desequilibrio térmico con su entorno (atmósfera y lecho) que en su discurrir hacia aguas abajo se ira corrigiendo (se incrementa la temperatura).

El objetivo principal de esta Tesis es caracterizar como un embalse situado en zona de clima mediterráneo modifica el comportamiento térmico natural del río, especialmente en verano. Así mismo se estudia la recuperación de ese comportamiento aguas abajo del embalse. Todo ello directamente vinculado al sistema de embalses consecutivos Mequinenza – Ribarroja – Flix, situados en el tramo final del río Ebro.

## 2.- RESUMEN.

A continuación se expone de forma resumida el contenido de los diferentes capítulos de la Tesis.

### 2.1.- Capítulo 1. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

En este capítulo se presenta una revisión del estado del conocimiento referido al problema objeto de estudio: análisis de la alteración del comportamiento térmico del río aguas abajo de un embalse.

Se resumen los trabajos que tratan del comportamiento térmico de los ríos dividiéndolos en dos grupos: los que tienen en cuenta el intercambio de calor entre el agua y el lecho, y los que no consideran este intercambio. Aunque hay pocos trabajos que lo traten, la revisión bibliográfica pone de manifiesto la importancia que el calor intercambiado con el lecho tiene en el ciclo diario de la temperatura del agua en un río.

Asimismo se pone en evidencia la práctica ausencia de trabajos que traten del comportamiento térmico de un río aguas abajo de un embalse.

El análisis de la bibliografía hace también énfasis en las diferentes metodologías propuestas para establecer el balance térmico del agua cuando se desplaza a lo largo de un tramo de río y, especialmente, en los criterios utilizados para evaluar las diferentes transferencias de calor entre el río y su entorno. Especial mención merece a éste respecto el trabajo de Edinger *et al* (1974).

### 2.2.- Capítulo 2. BALANCE TÉRMICO DE UN TRAMO DE RÍO

Se presenta de una forma detallada la metodología que se utiliza en esta Tesis para realizar el balance térmico de una masa de agua que se desplaza a lo largo de un tramo de río. Dicha metodología establece un balance entre las potencias calóricas recibidas, emitidas y almacenada por el agua a lo largo de su recorrido. Mediante los datos de campo disponibles se evalúan las diferentes variables incluidas en la ecuación de balance excepto dos que se consideran incógnitas: el ancho eficaz y el intercambio de calor del agua con el cauce del río. Plantear el balance con estas dos incógnitas constituye una aportación a la propuesta realizada por Edinger *et al*. (1974) en la que se basa la metodología utilizada en esta Tesis.

Se define el ancho eficaz de un tramo de río como el valor medio del ancho que participa en el transporte y, por tanto, está asociado al agua en movimiento. Es decir, el ancho eficaz no contempla las zonas de río situadas junto a las márgenes con velocidades prácticamente nulas. Evidentemente el ancho eficaz siempre será menor o igual al ancho medio obtenido mediante información cartográfica, donde se refleja la superficie total ocupada por el agua. La notable dificultad que supone determinar directamente el ancho eficaz de un tramo de río justifica que se considere incógnita en la ecuación del balance térmico.

En su recorrido a lo largo de un tramo de río el agua intercambia calor con el lecho. Normalmente este intercambio consiste en que el lecho almacena calor en las horas de fuerte radiación solar ( cuando el agua del río incrementa su temperatura) y lo cede al agua durante la noche. Al ser prácticamente cíclica la evolución diaria de la temperatura del agua del río, parece lógica la hipótesis que establece un valor nulo para el calor almacenado por el lecho de un tramo de río cuando se considera un periodo de tiempo que abarca un número

entero de días. Al exigir que se verifique esta hipótesis, la ecuación de balance permite obtener una nueva ecuación que solo tiene una incógnita: el ancho eficaz. Una vez obtenido el ancho eficaz, la ecuación del balance solo presenta como incógnita el intercambio de calor con el lecho y, por tanto, es posible determinar esta variable. De este modo puede estudiarse la evolución temporal del comportamiento térmico de un tramo de río para intervalos de tiempo inferiores a un día, teniendo en cuenta el intercambio de calor en el lecho. Ello supone una aportación, ya que normalmente hasta ahora el balance térmico raramente se ha establecido para intervalos inferiores a un día, lo que hace imposible el análisis del ciclo térmico diario.

### **2.3.- Capítulo 3. ZONA DE ESTUDIO Y MEDIDAS DE CAMPO**

En el capítulo tres se describe la zona de estudio y la instrumentación de campo utilizada. Es objeto de estudio el tramo de río Ebro comprendido entre Escatrón y Miravet. Escatrón se encuentra justo aguas arriba del sistema de embalses consecutivos Mequinenza – Ribarroja – Flix, figura 1. Estos embalses modifican el comportamiento térmico natural del río, lo que es objeto de estudio en esta Tesis. Aguas abajo de Flix el río tiende a recuperar el equilibrio térmico con su entorno. Ello se pone de manifiesto a lo largo del tramo de 33.9 kilómetros comprendidos entre Flix y Miravet.

Se instalaron sensores de temperatura y de presión (para conocer el nivel del río) en Escatrón (entrada del Ebro al embalse de Mequinenza), a la salida de turbinas de la CH Mequinenza, en Aitona (aguas arriba de la entrada del Segre al embalse de Ribarroja), en Fraga (aguas arriba de la entrada del Cinca al embalse de Ribarroja), a la salida de turbinas de la CH de Ribarroja, a la salida de turbinas de la CH de Flix, justo antes de la toma de refrigeración de la CN Ascó (a 5.3 kilómetros aguas abajo de la CH Flix), en Pas de L’Ase situado a 6.6 kilómetros aguas abajo de CN Ascó (en Pas de L’Ase solo se midieron temperaturas) y en Miravet que se encuentra a 22 kilómetros aguas abajo de Pas de L’Ase.

En Escatrón, Ribarroja y Miravet se instalaron estaciones meteorológicas donde se midió temperatura del aire, radiación solar, radiación neta, humedad relativa, lluvia, velocidad y dirección del viento.

Se tomaron medidas cada minuto y se almacenaba la media de diez minutos. La información se transmitía vía telefónica a la UPC. En algunas estaciones de medida se empezó a disponer de información fiable en julio de 1997 y a partir de mayo de 1998 todas suministraron medidas. La información de campo utilizada en la Tesis abarca un periodo que se inicia el 1 de enero de 1998, excepto en Pas de L’Ase y Miravet que comienzan en abril-mayo de 1998. El final del periodo se sitúa en el 31 de diciembre de 1999 para las estaciones situadas aguas arriba de la CH Flix y en el 31 de diciembre de 2000 para las estaciones aguas abajo de la CH Flix (incluida ésta).

### **2.4.- Capítulo 4. ANÁLISIS DE LOS CAUDALES CIRCULANTES EN EL TRAMO FLIX – MIRAVET. VARIABILIDAD TEMPORAL**

El régimen de caudales del río Ebro aguas abajo de la CH Flix está fuertemente condicionado por la explotación de las centrales hidroeléctricas de Ribarroja y Flix. Ello es analizado en el capítulo cuatro. Así, por ejemplo, en la figura 2 puede observarse la evolución temporal de los niveles relativos del agua en Escatrón y Flix. Estos niveles relativos se miden respecto al valor medio del nivel a lo largo de todo el periodo considerado y se expresan en valores medios horarios, diarios y semanales.

Al comparar CH Flix con Escatrón se observa un fuerte incremento de la variabilidad temporal de niveles medios horarios y diarios. En la figura 3 también se pone de manifiesto esta variabilidad al analizar la desviación típica de los niveles medios horarios a lo largo de un día. La evolución de la desviación típica de los niveles medios diarios a lo largo de una semana muestran una escasa incidencia de los aprovechamientos hidroeléctricos. En cambio si se pone de manifiesto el efecto regulador de los embalses al comparar Escatrón con CH Flix. En Escatrón se observa un periodo de elevados e irregulares caudales (o niveles) a finales de 1998 y principios de 1999, lo que se presenta muy suavizado en la CH Flix.

En la figura 4 se analiza la diferencia entre dos valores consecutivos del nivel medio horario. También se presenta la diferencia entre el valor máximo y mínimo del nivel medio en diez minutos a lo largo de un día. En ambos casos se vuelve a poner en evidencia la fuerte variabilidad de los niveles en la CH Flix.



Figura 1. Localización de la zona de estudio.

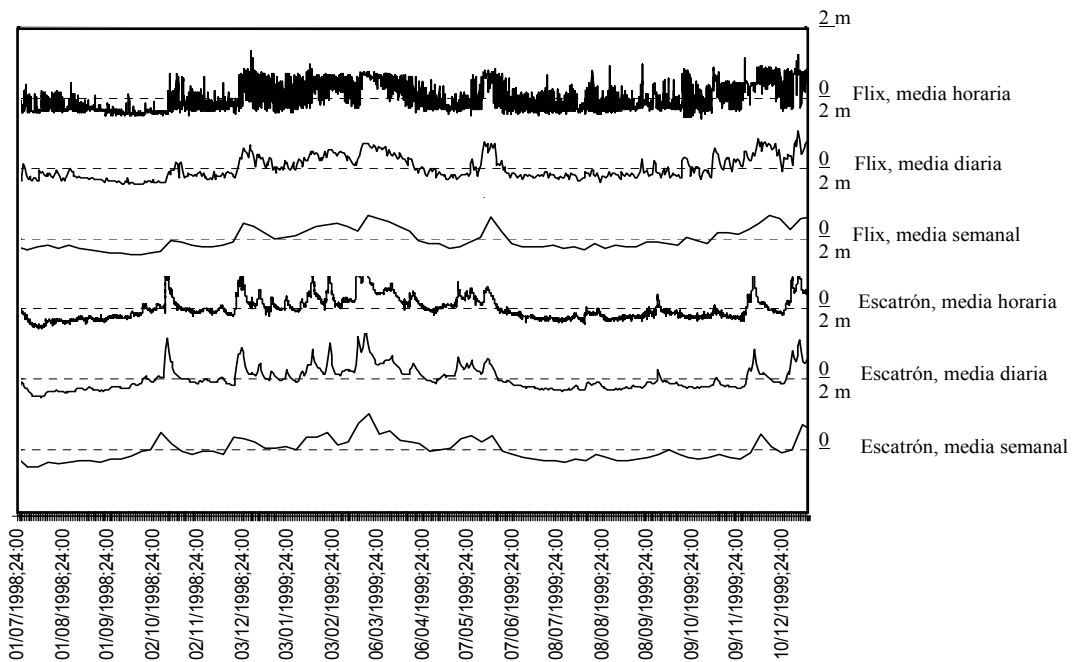


Figura 2 Niveles relativos en el río Ebro

En la figura 5 puede verse la evolución de los caudales en la CH Flix y en la figura 6 su desviación típica. Se observa una acusada variabilidad temporal debida, como ya ha sido comentado al analizar los niveles, a la explotación de las centrales hidroeléctricas situadas inmediatamente aguas arriba. Ello también se pone claramente de manifiesto al considerar el gradiente temporal de caudales, figura 7 y 8.

En este capítulo también se ha encontrado una cierta discrepancia entre los caudales obtenidos en esta Tesis mediante los registros de niveles tomados en la CH Flix y los caudales medios mensuales correspondientes a

las estaciones de aforo de que dispone la Confederación Hidrográfica del Ebro en Ascó y Tortosa. Estas discrepancias pueden superar el 10% y normalmente suponen valores mayores para los caudales obtenidos en la Tesis.

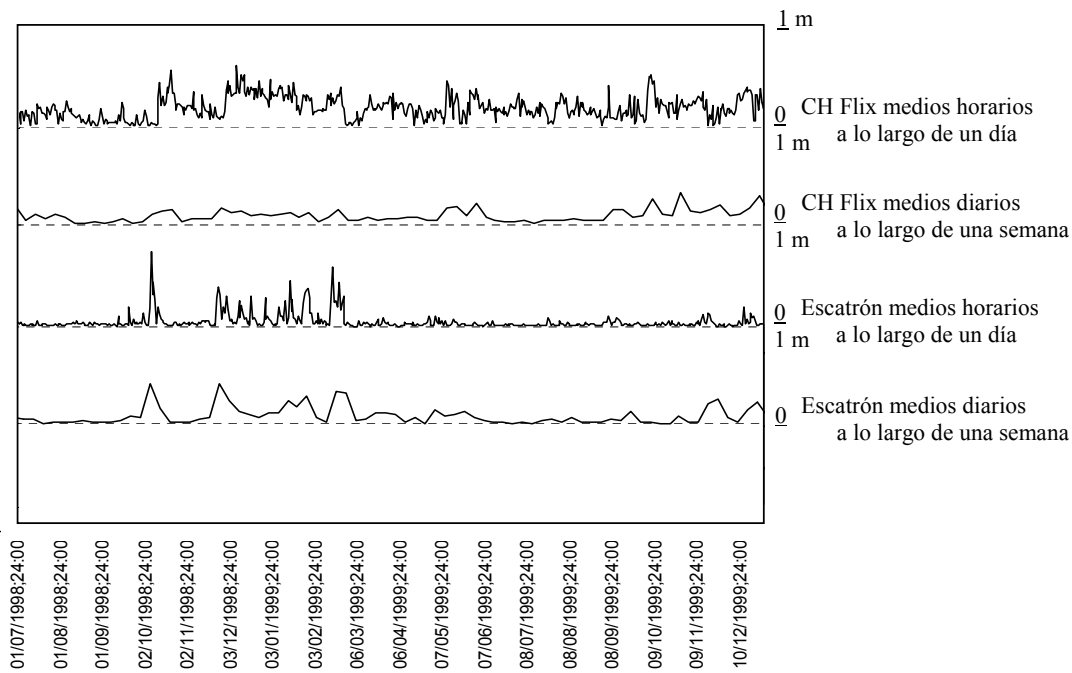


Figura 3.- Desviación típica de niveles en el río Ebro al considerar valores medios horarios a lo largo de un día y valores medios diarios a lo largo de una semana

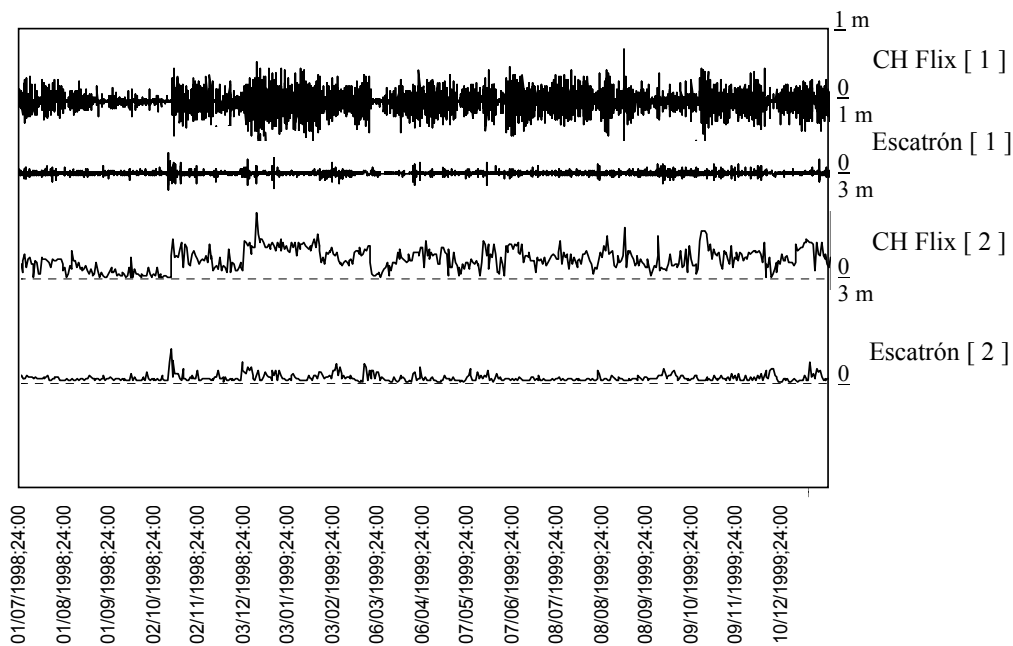


Figura 4.- [ 1 ] Diferencia entre dos valores consecutivos del nivel medio en una hora ; y [ 2 ] Diferencia entre el valor máximo y mínimo del nivel medio en 10 minutos a lo largo de un día

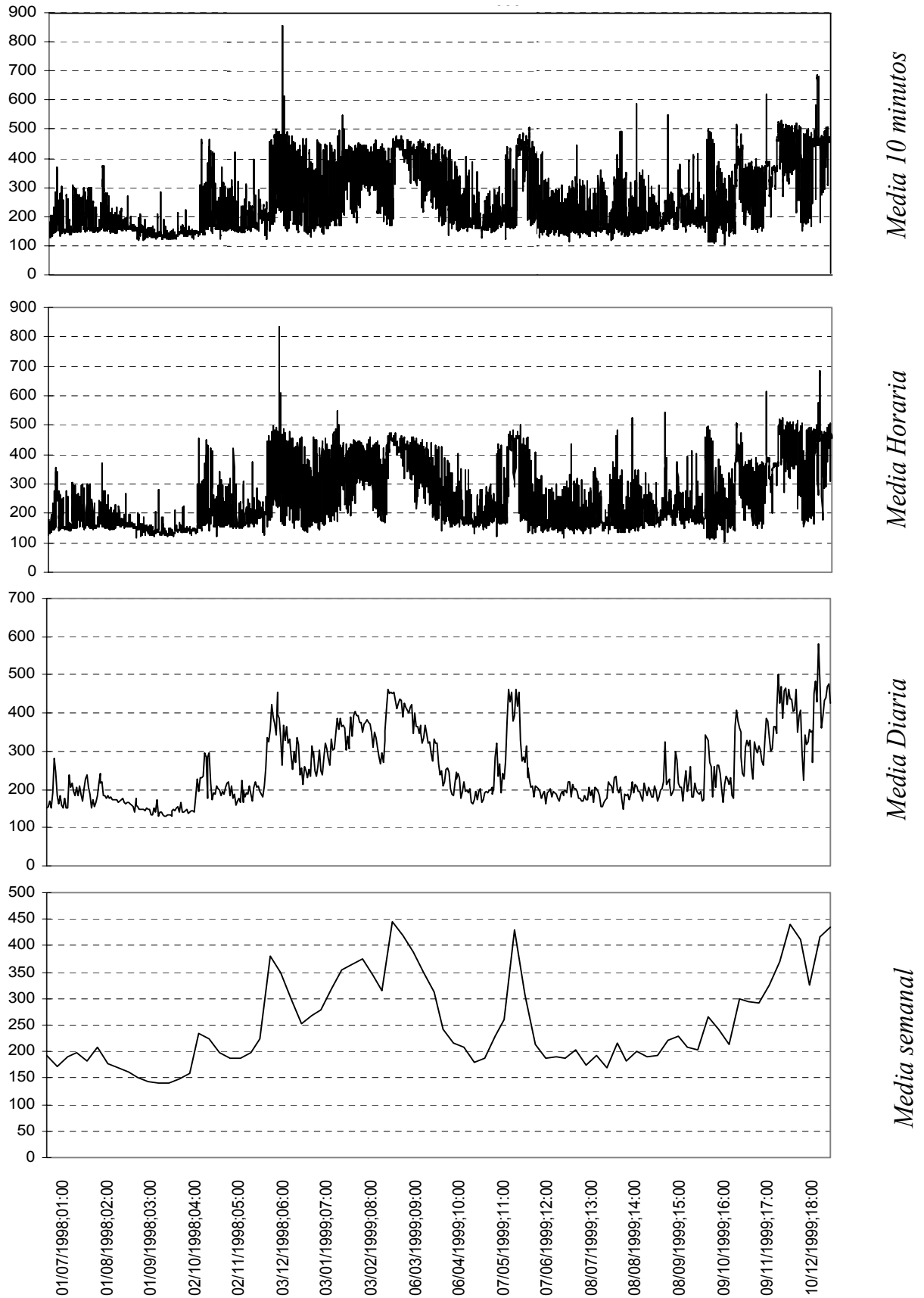


Figura 5.- Caudales en CH Flix (m<sup>3</sup>/s)

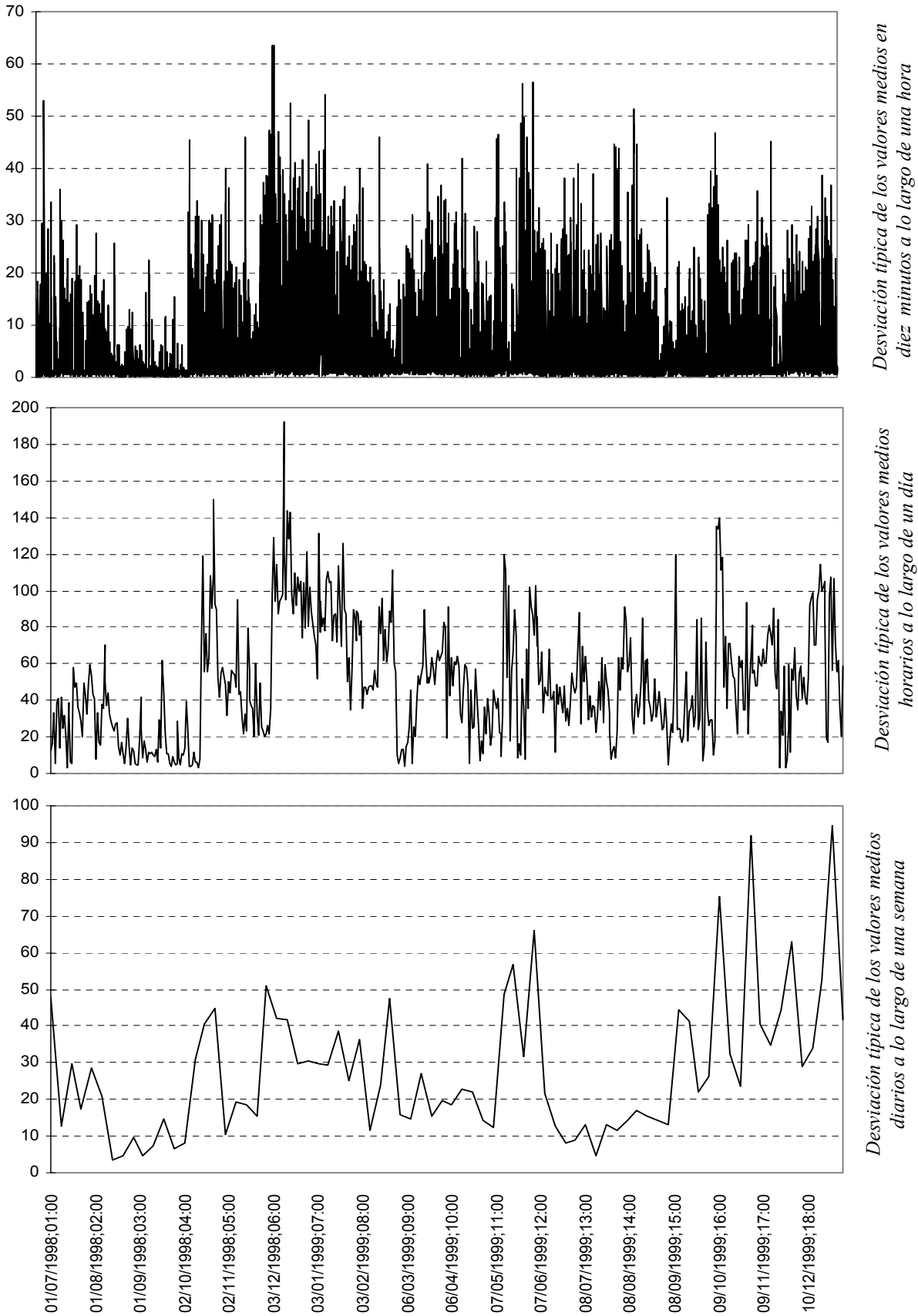


Figura 6.- Desviación típica de caudales en CH Flix ( $m^3/s$ ) al considerar valores medios cada diez minutos a lo largo de una hora, valores medios horarios a lo largo de un día y valores medios diarios a lo largo de una semana

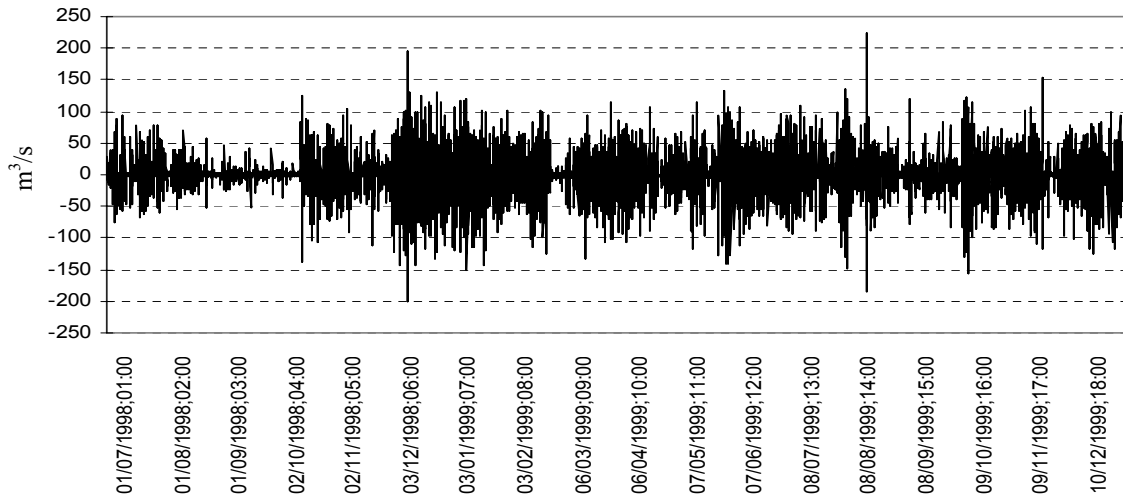


Figura 7.- Diferencia entre dos valores consecutivos del caudal medio horario en CH Flix (m³/s)

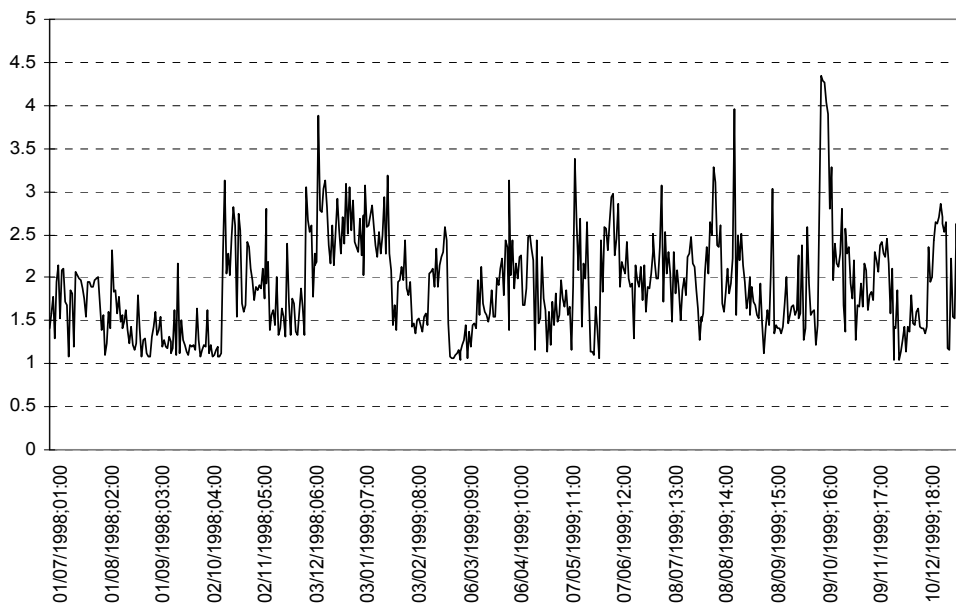


Figura 8.- Cociente entre los valores máximos y mínimos del caudal medio en diez minutos a lo largo de un día en CH Flix.

## 2.5.- Capítulo 5. ALTERACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL RÍO EBRO DEBIDO AL SISTEMA DE EMBALSES MEQUINENZA - RIBARROJA - FLIX

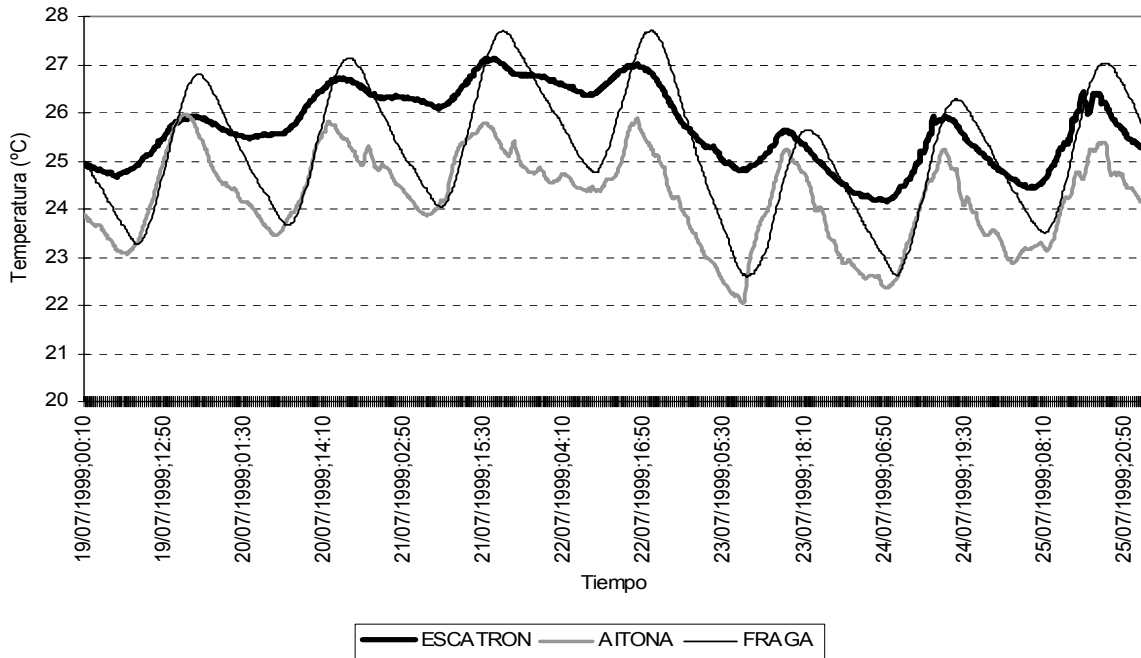
La presencia del sistema de embalses Mequinenza – Ribarroja – Flix modifica el comportamiento térmico del río Ebro. Ello se pone de manifiesto en la figura 9 donde se presenta la variación de la temperatura media en 10 minutos para unos días de verano con fuerte radiación solar de onda corta (días sin nubes). Se ve que aguas arriba de los embalses (Escatrón, Aitona, Fraga) la temperatura presenta una marcada variación cíclica diaria, muy acusada en Fraga (río Cinca) y notablemente inferior en Escatrón (río Ebro). Ello puede justificarse por los menores calados que presenta el Cinca respecto al Ebro y, por tanto, la mayor sensibilidad de su régimen de temperaturas a la variación de la situación térmica que se da en la atmósfera.

A la salida de los embalses (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.

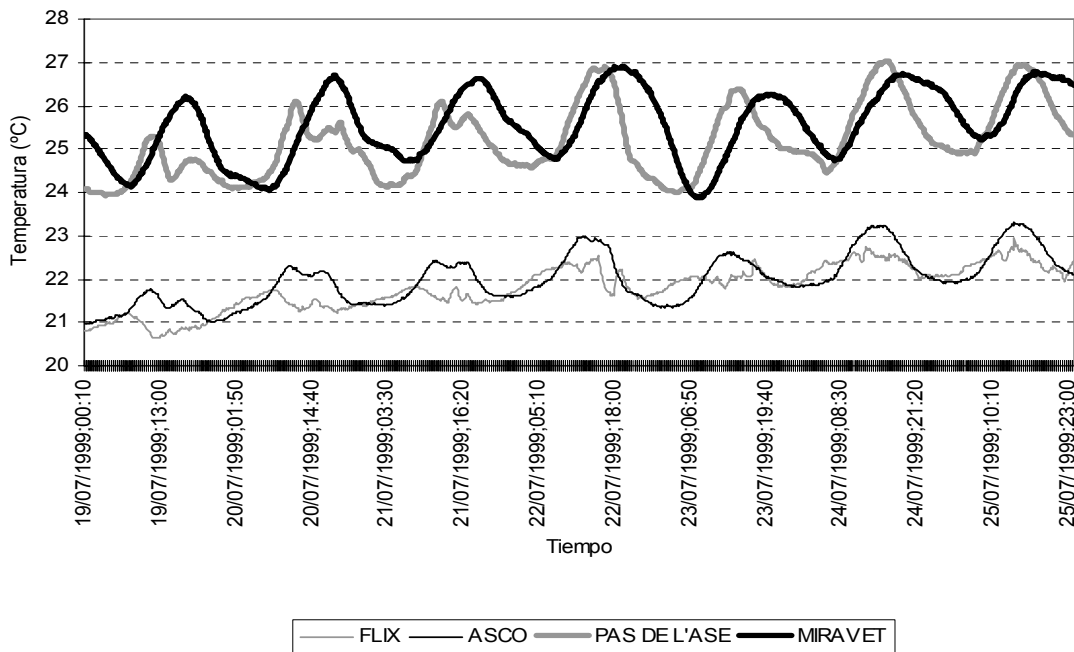
RESUMEN Y CONCLUSIONES

También puede observarse como aguas abajo de CH Flix (CN Ascó, Pas de L'Ase y Miravet) el agua tiende a recuperar su comportamiento cíclico diario. Comparando CH Flix con CN Ascó, se constata como el agua tiende a incrementar su temperatura. Cabe indicar que el aumento de temperatura que tiene lugar entre CN Ascó y 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 medida situada más aguas abajo (Miravet) las temperaturas son semejantes a las correspondientes aguas arriba de los embalses.



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



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

Figura 9.- Temperaturas medias cada 10 minutos en de días de verano sin nubes

En la figura 10 se analiza la alteración de la temperatura provocada por los embalses en días de invierno sin nubes. La forma cíclica diaria esta muy marcada en Fraga, menos en Aitona y mínima en Escatrón. Se ve también que la temperatura en Escatrón es 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 CH Flix más regular que en verano; aunque con menos variación de la temperatura diaria.

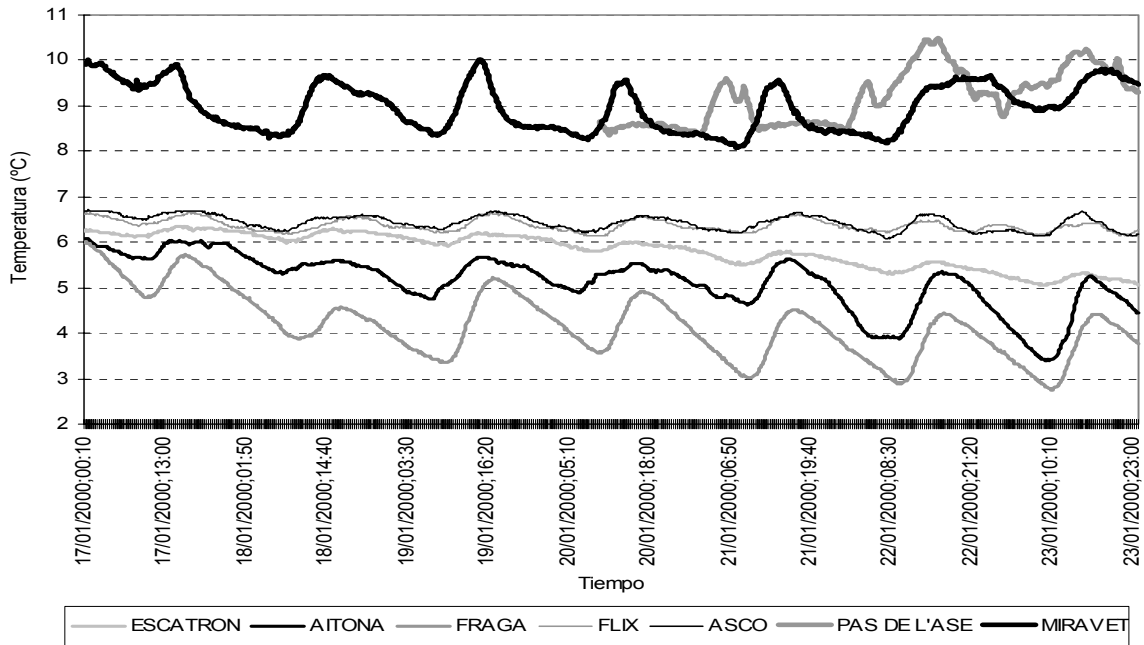


Figura 10.- Temperatura media cada 10 minutos en días de invierno sin nubes (17/enero/00 – 23/enero/00)

En la figura 11 se compara la media de las temperaturas medias semanales en las tres estaciones de medida situadas a la entrada de los embalses (Escatrón, Aitona y Fraga) con la temperatura media semanal a la salida, en la CH Flix. Se observa que durante el verano la temperatura del agua 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 es superior. La diferencia que hay de temperatura entre la salida y la entrada se mueve en un rango de  $\pm 4^{\circ}\text{C}$ , estando muy bien marcada el comportamiento cíclico anual.

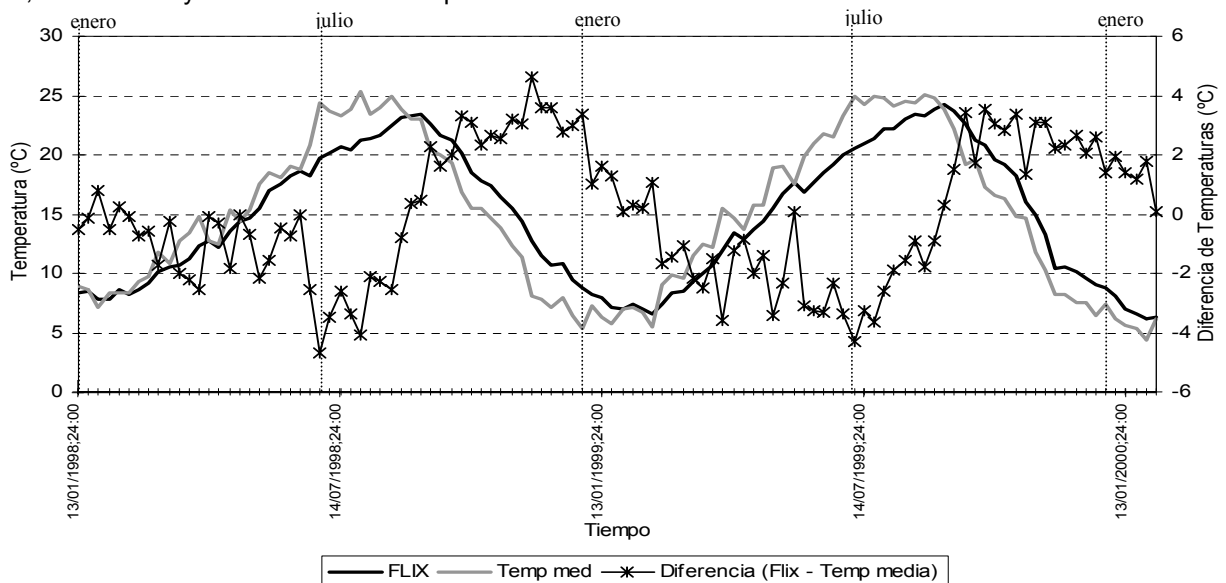


Figura 11.- Temperatura media a la entrada de los embalses y diferencia con la temperatura a la salida en CH Flix. Todas la temperaturas se refieren a la media semanal (13/enero/1998 – 31/enero/2000).

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 figura 12 se presentan las medias semanales de las amplitudes diarias de temperatura aguas arriba de los embalses y en la figura 13 aguas abajo.

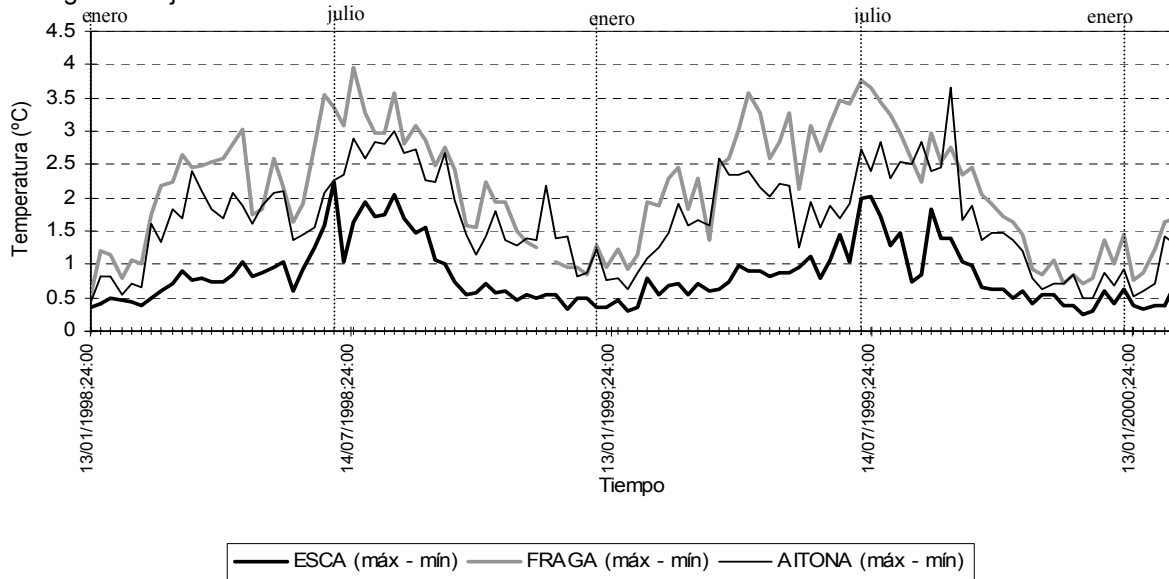


Figura 12.- Amplitud de la temperatura diaria del agua, aguas arriba de los embalses. Valor en media semanal (13/enero/1998 – 31/enero/2000).

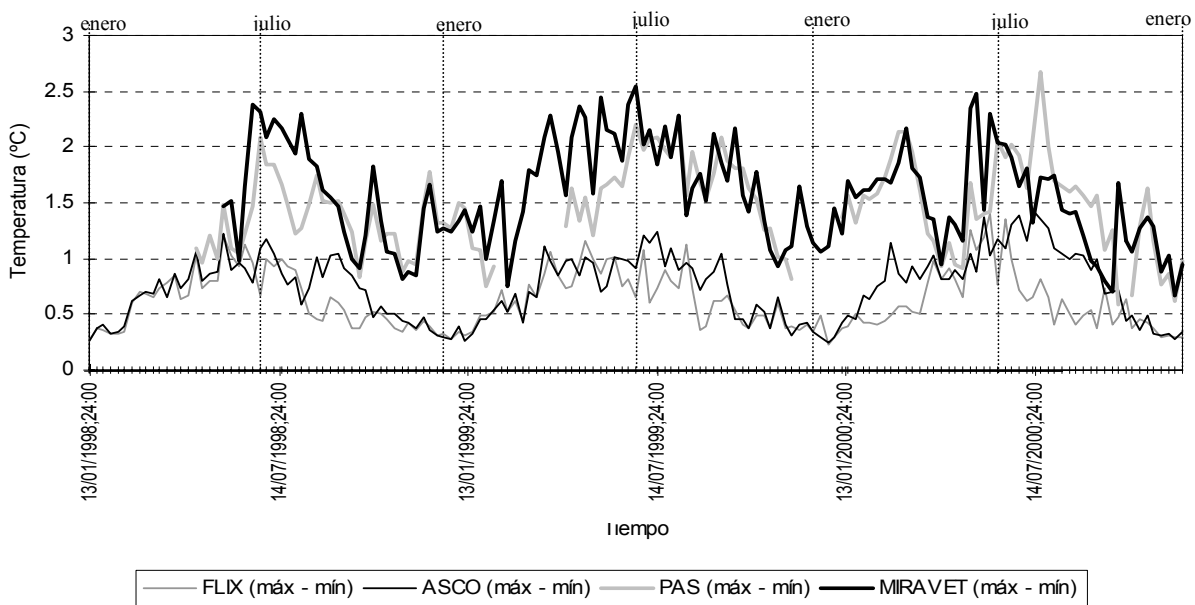


Figura 13.- Amplitud de la temperatura diaria del agua, aguas abajo de los embalses. Valor en media semanal (13/enero/1998 – 31/diciembre/2000).

Se puede observar que en Escatrón la amplitud es menor que en Fraga y Aitona. Ello es debido a que los menores calados del Cinca (en Fraga) y del Segre (en Aitona) respecto al Ebro (en Escatrón) hacen que sea más pequeña la inercia del río para seguir las fluctuaciones térmicas de la atmósfera. En la figura 13 se pueden apreciar dos grupos, uno correspondiente a 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 de los grupos es el de Pas de L’Ase y Miravet, donde el rango de la amplitud va de 1°C 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 como aguas abajo de los embalses, en 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 (Pas de L’Ase, Miravet).

En su desplazamiento a lo largo del tramo CH Flix – CN Ascó, una masa de agua almacena una cantidad de calor que es proporcional al producto del caudal por el incremento de temperatura que sufre en dicho desplazamiento. Este calor almacenado es mayor en verano y en las horas centrales de día, cuando es máxima la radiación solar incidente de onda corta. Ello es debido a que esta radiación es la fuente de energía calórica más importante de las que intervienen en el balance térmico de una masa de agua que se desplaza por el río. Por tanto, cabe esperar que exista una cierta coincidencia entre la hora del día en que se produce un máximo valor del producto del caudal por el incremento de temperatura que sufre el agua al recorrer un tramo de río y la hora en que la radiación solar incidente de onda corta sobre dicho tramo es máxima. Al exigir el cumplimiento de esta hipótesis a lo largo de los veranos de 1998, 1999 y 2000 se obtiene que una masa de agua tarda unos 160 minutos en desplazarse desde CH Flix a la CN Ascó. Por tanto, teniendo en cuenta que la longitud del tramo CH Flix – CN Ascó es de 5.3 kilómetros, la velocidad con que se desplaza el agua es aproximadamente de 0.55 m/s. Este tiempo de desplazamiento es un dato necesario para establecer el balance térmico en el tramo de río comprendido entre el CH Flix y la CN Ascó.

## 2.6.- Capítulo 6. BALANCE TÉRMICO DEL TRAMO DE RÍO EBRO COMPRENDIDO ENTRE LA CH FLIX Y LA CN ASCÓ

El balance se lleva a cabo considerando dos intervalos temporales diferentes: 24 horas y diez minutos. Usualmente el balance térmico en un tramo de río se ha realizado considerando el valor medio diario de las variables que intervienen (intervalo de 24 horas). En este capítulo se verá que al tomar un intervalo temporal muy inferior (diez minutos) se facilita el análisis del intercambio de calor con el lecho del río.

El agua al circular en el tramo CH Flix – CN Ascó tiende a reducir su desequilibrio térmico con el entorno provocado por los embalses situados inmediatamente aguas arriba. Se ha visto, capítulo 5, que en verano dicho desequilibrio térmico es más acusado; normalmente el agua presenta en la CH Flix una temperatura inferior a la que tendría en ese mismo punto si no existieran embalses. Por este motivo una masa de agua que en verano se desplaza desde CH Flix a CN Ascó normalmente incrementa su temperatura.

Cabe indicar que el tramo considerado tiene su extremo aguas abajo justo antes de la toma para la refrigeración de la CN Ascó y, por tanto no está afectado por la descarga térmica de dicha refrigeración.

El balance térmico se llevará a cabo en el periodo comprendido entre el 16 de julio y el 31 de agosto de 2000. Al analizar el balance con los valores medios diarios de las variables que están en él involucradas, no se tiene en cuenta la potencia calórica intercambiada con el lecho ya que su valor medio diario se considera nulo.

En la figura 14 se presentan las diferentes potencias que recibe (positivas) o emite (negativas) el agua.

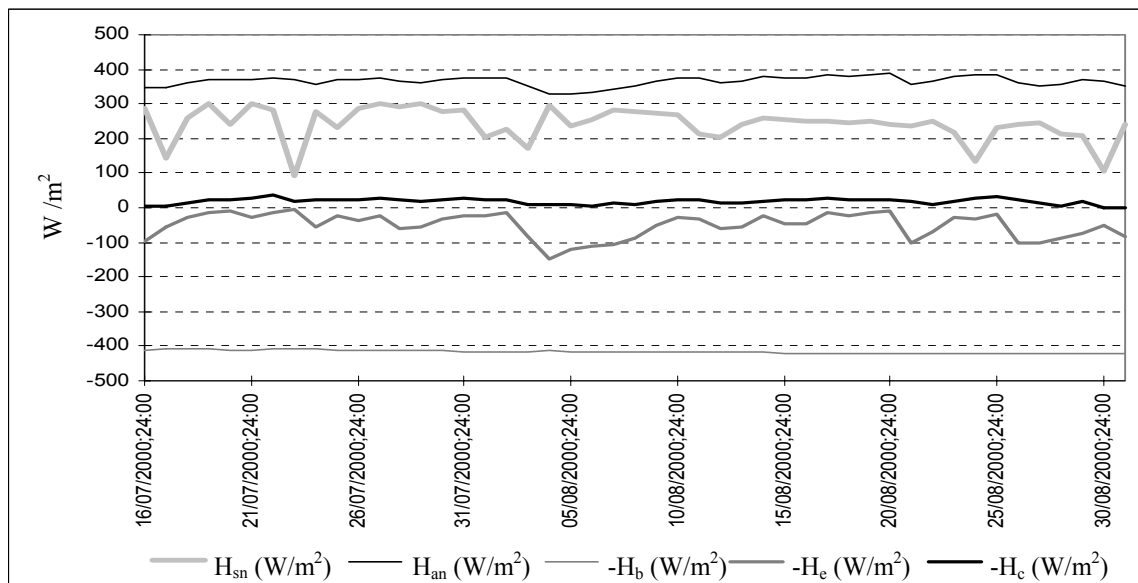


Figura 14.- Radiación solar neta,  $H_{sn}$ ; radiación atmosférica de onda larga,  $H_{an}$ ; radiación de onda larga emitida por el agua,  $H_b$ ; evaporación,  $H_e$ ; y conducción,  $H_c$ ; en valores medio diarios a lo largo del periodo 16/ julio – 31/agosto del 2000.

Se observa que es prácticamente nula la potencia resultante al sumar la correspondiente radiación atmosférica neta de onda larga (positiva), a la radiación de onda larga emitida por el agua (negativa) y al calor por conducción (positiva). Además estas tres potencias varían poco a lo largo del periodo. Las otras dos variables, radiación solar neta (positiva) y el calor perdido por evaporación (negativo), sí que sufren variaciones importantes. Como resumen puede decirse que, de una forma aproximada, la potencia calórica comunicada al agua en su desplazamiento a lo largo del tramo CH Flix – CN Ascó es sensiblemente igual a la potencia correspondiente a la radiación solar menos la debida a la evaporación.

En la figura 15 se presenta el resultado del balance térmico agrupando las variables que intervienen en tres conjuntos: potencia incidente sobre el agua, potencia emitida por el agua y potencia almacenada por el agua en se desplazamiento entre CH Flix y CN Ascó. Evidentemente, la potencia almacenada debe ser igual a la incidente menos la emitida. Otra vez es de interés indicar que se considera nula la potencia media diaria intercambiada con el lecho.

El ancho eficaz ha resultando ser de 127 metros. Según la información topográfica disponible (planos a escala 1/5000) el ancho medio de este tramo de río es de unos 140 metros. Es lógico que el ancho eficaz (correspondiente solo al agua en movimiento) sea inferior al ancho total ocupado por el agua. Éste último incluye el agua prácticamente inmóvil situada junto a las orillas y que, en principio, parece lógico no considerarlo al establecer el balance térmico en un tramo de río.

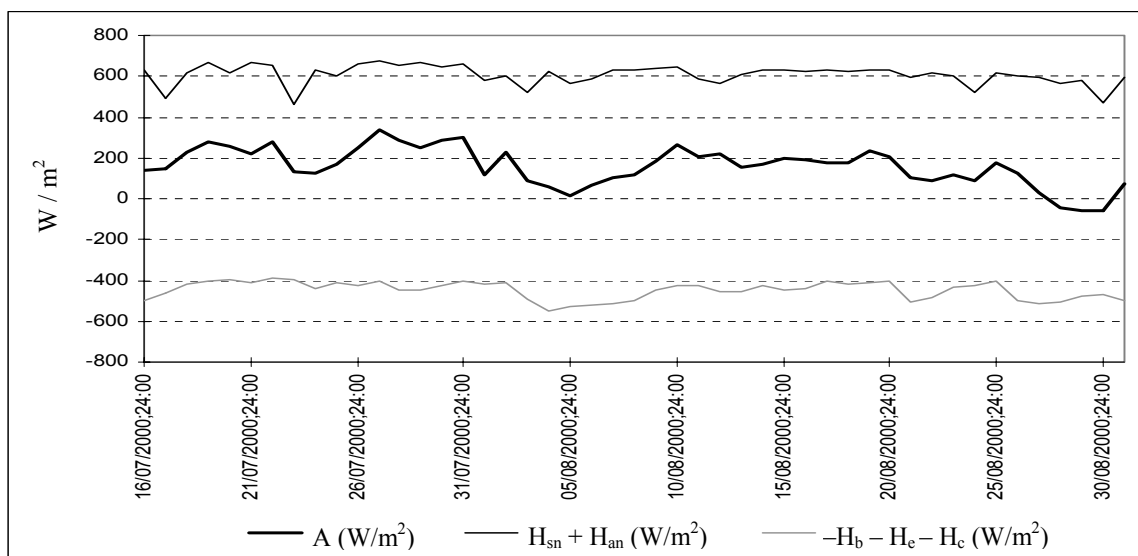


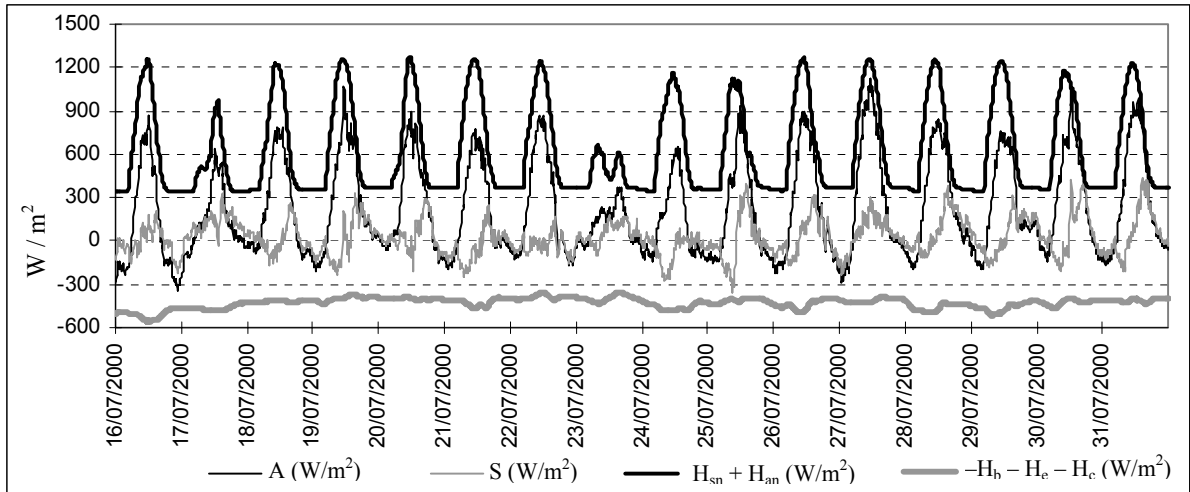
Figura 15.- Almacenamiento de calor, A; potencia recibida,  $H_{sn} + H_{an}$ ; potencia perdida,  $-H_b - H_e - H_c$ .  
En valores medio diarios a lo largo del periodo 16/julio – 31/agosto del 2000.

Para el periodo relacionado (del 16 de julio al 31 de agosto de 2000) y ya utilizado para realizar el balance con valores medios diarios, se lleva a cabo el balance térmico con valores medios cada diez minutos. Al establecer el balance con un intervalo temporal de diez minutos, también se podrá poner de manifiesto la notable importancia que tiene el intercambio de calor entre el agua y el lecho del río en la evolución de la temperatura a lo largo del día.

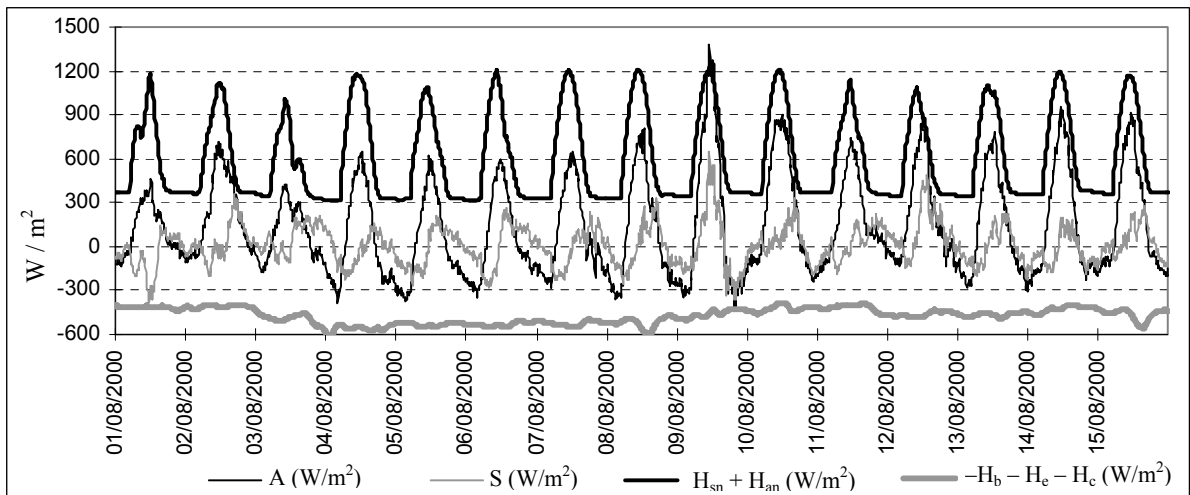
Cabe indicar la escasa bibliografía existente referida al estudio del balance térmico de un tramo de río utilizando intervalos inferiores a un día. Ello ha sido puesto de manifiesto en el capítulo 1 dedicado a la revisión del estado del conocimiento. El balance se establece mediante valores medios cada diez minutos. El ancho eficaz ha resultado ser de 132 metros. Este ancho es próximo al obtenido al realizar el balance con valores medios diarios (127 m) y, como es lógico, también inferior al ancho medio medido en plano (140 m).

En la gráfica 16 se muestra la suma de las potencias incidentes, la suma de la emitidas, la potencia intercambiada con el lecho y la potencia almacenada por el agua en su desplazamiento entre la CH Flix y la CN Ascó. La resultante de las tres primeras debe ser igual a la potencia almacenada. En todas estas gráficas se pone en evidencia el ciclo diario de las variables que intervienen en el balance térmico. Este ciclo en gran medida esta impuesto por la marcada evolución diaria de la radiación solar de onda corta que, como ya ha sido expuesto, puede considerarse la principal fuente de calor.

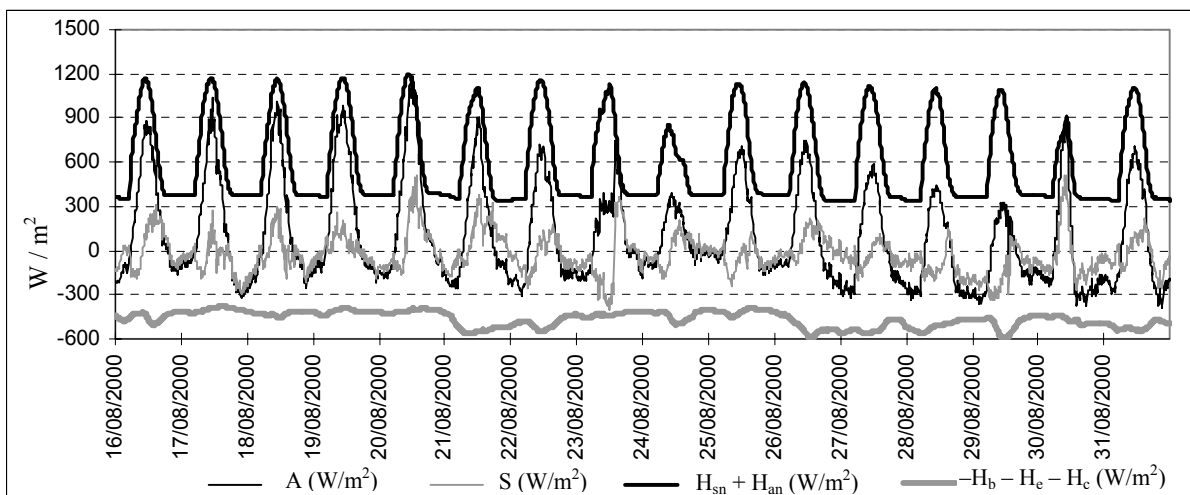
Como consecuencia de ello, tanto el calor almacenado por el agua al desplazarse entre CH Flix y CN Ascó como el calor intercambiado con el lecho del río, presenta un acusado ciclo diario, figura 16.



Periodo del 16 de julio al 31 de julio del 2000



Periodo del 1 de agosto al 15 de agosto del 2000



Periodo del 16 de agosto al 31 de agosto del 2000

Figura 16.- Almacenamiento de calor, A; calor intercambiado con el lecho del río, S; potencias absorbidas por el agua,  $H_{sn} + H_{sn}$ ; potencias emitidas por el agua,  $-H_b - H_c - H_c$ . Valores medios cada diez minutos.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Con el objeto de facilitar el análisis del comportamiento térmico del tramo CH Flix – CN Ascó, dentro del periodo que se esta considerando para realizar el balance térmico se han elegido grupos de pocos días consecutivos que presenten un caudal prácticamente constante y una elevada radiación solar incidente. Para estos días se realiza el balance térmico con intervalo temporal de diez minutos. En la Tesis se han elegido tres grupos de 2 ó 3 días. En la figura 17 se analiza para uno de estos grupos la evolución temporal de las diferentes potencias calóricas intercambiadas con la atmósfera y se presentan los resultados en la figura 18.

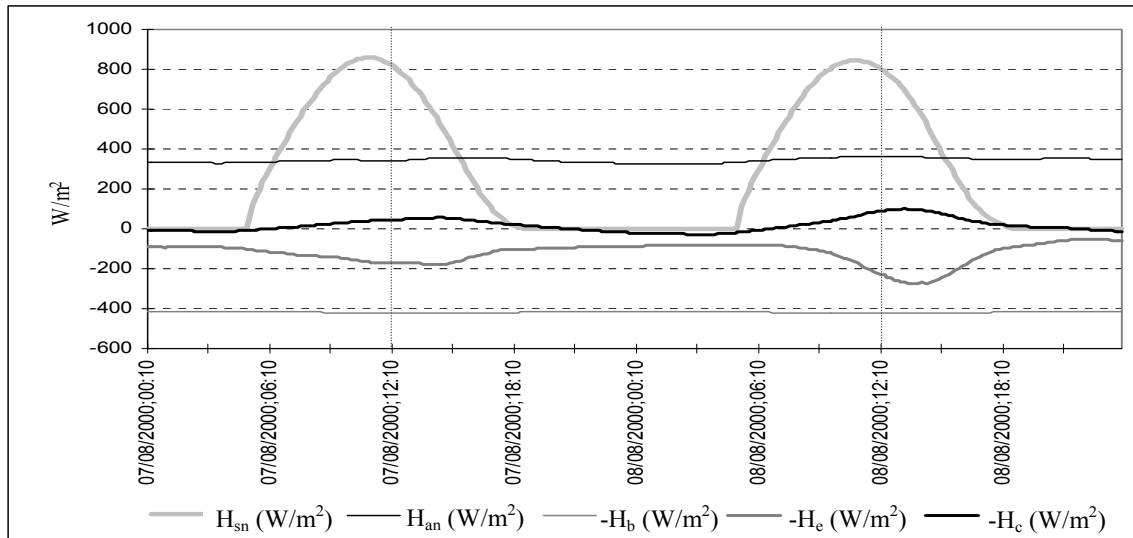


Figura 17.- Radiación solar neta,  $H_{sn}$ ; radiación atmosférica neta de onda larga,  $H_{an}$ ; radiación emitida por el agua de onda larga,  $-H_b$ ; pérdida de calor por evaporación,  $-H_e$ ; pérdida de calor por conducción,  $-H_c$ ; para 7-8 de agosto del 2000. La línea vertical indica el mediodía.  
Valores medios cada diez minutos.

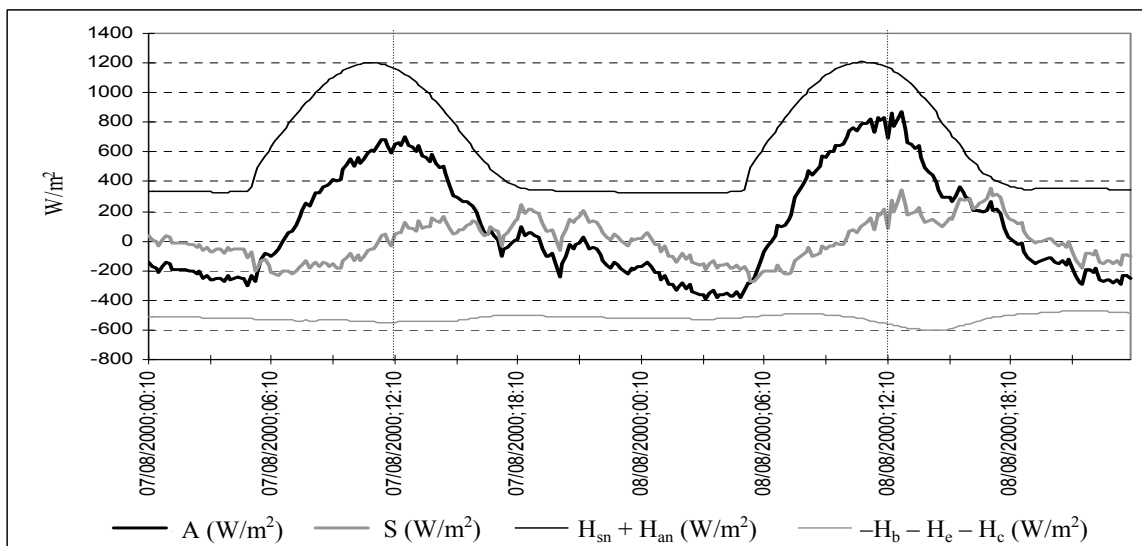


Figura 18.- Almacenamiento de calor, A; calor intercambiado con el lecho del río, S; potencias absorbidas por el agua,  $H_{sn} + H_{an}$ ; potencias emitidas por el agua,  $-H_b - H_e - H_c$ ; para 7-8 de agosto del 2000. La línea vertical indica el mediodía.  
Valores medios cada diez minutos.

Puede observarse un acusado ciclo diario. Así mismo es de interés indicar que la potencia asociada a la radiación solar neta de onda corta presenta unos máximos (al mediodía) de  $800 \text{ W/m}^2$ . Cabe recordar que los días elegidos no presentan nubes, tal como muestra la continuidad de la radiación solar. También puede observarse que es prácticamente nula la suma de la radiación atmosférica neta de onda larga, de la radiación de onda larga emitida por el agua y del calor transmitido por conducción. Ello indica, como ya se ha sido puesto de manifiesto anteriormente, que la potencia calórica intercambiada por la atmósfera esta fuertemente condicionada por la radiación solar y, en menor medida, por la evaporación. La mayor potencia calórica cedida por el agua a la atmósfera corresponde a la radiación de onda larga emitida por el agua, y presenta un valor casi constante de aproximadamente  $400 \text{ W/m}^2$ . La potencia asociada a la radiación atmosférica neta de onda larga es de valor inferior al correspondiente a la radiación solar y se mantiene prácticamente constante a lo largo de todo el día, siendo su valor unos  $350 \text{ W/m}^2$ .

La variabilidad que presenta la velocidad del viento es la causa del comportamiento notablemente fluctuante que tiene la pérdida de energía por evaporación. En cuanto a la potencia calórica intercambiada con la atmósfera por conducción, normalmente en estos días de verano sin nubes presenta un valor positivo durante el día (potencia recibida por el agua) y valor prácticamente nulo a ligeramente negativo durante la noche (potencia emitida por el agua).

Las potencias que absorbe el agua son la radiación solar neta más la radiación atmosférica de onda larga,  $H_{sn}+H_{an}$ ; esa suma varía entre los  $400 \text{ W/m}^2$  en horas de la noche hasta los  $1200 \text{ W/m}^2$  en las horas de máxima radiación solar. Las potencias emitidas por el agua son la suma de la radiación de onda larga emitida por el agua más la evaporación y la conducción,  $-H_b-H_e-H_c$ ; la suma de estas potencias oscila entre los  $-500 \text{ W/m}^2$  y los  $-600 \text{ W/m}^2$ . Dicha fluctuación sigue el comportamiento de la evaporación.

También queda patente el efecto regulador que el intercambio de calor con el lecho tiene sobre el comportamiento térmico de un tramo de río; el lecho gana calor durante las horas que el agua recibe mayor potencia calórica desde la atmósfera y cede calor cuando es mayor la transmisión de calor del agua a la atmósfera.

### 3.- RESULTADOS MAS DESTACABLES. CONCLUSIONES.

Los resultados que se consideran más relevantes son:

- *Capítulo 1.*

Se pone en evidencia la escasa información que existe sobre el comportamiento térmico del río aguas abajo de un embalse. Ello es aún más acusado cuando se trata de estudiar el ciclo diario de dicho comportamiento térmico. También se pone de manifiesto la importancia que el intercambio de calor con el lecho del río tiene en ese ciclo diario y la dificultad que supone su estudio.

- *Capítulo 2.*

La ecuación de balance térmico de una masa de agua que se desplaza a lo largo de un tramo de río se plantea incorporando dos incógnitas: ancho eficaz e intercambio de calor con el lecho. Ello constituye una aportación a la metodología propuesta por Edinger *et al* (1974). Se establece la hipótesis de que debe ser nulo el calor almacenado por el lecho del río al considerar un periodo de tiempo que abarca un número entero de días. Al exigir el cumplimiento de esta hipótesis, la ecuación del balance se transforma en otra ecuación que sólo tiene por incógnita el ancho eficaz.

Una vez obtenido el ancho eficaz, la ecuación del balance permite calcular el intercambio térmico con el lecho. De este modo puede estudiarse con rigor la evolución de la temperatura del agua considerando pequeños intervalos de tiempo (diez minutos). Ello supone una aportación de esta Tesis, ya que hasta ahora en pocas ocasiones el balance térmico se ha establecido con intervalos de tiempo inferiores a un día, lo que hacía imposible el análisis del ciclo térmico diario.

- *Capítulo 3.*

Se dispone de un amplio y riguroso banco de datos de campo: temperatura del agua del río Ebro (nueve estaciones), nivel del río (ocho estaciones) y datos meteorológicos (tres estaciones). A partir de 1998 se toman mediciones cada minuto y se almacena la media de diez minutos. Ello ha permitido la realización de esta Tesis y hará posible que en un futuro se siga profundizando en el estudio de la incidencia de los embalses en el régimen natural de la temperatura del agua del río y del caudal.

- *Capítulo 4*

El régimen de caudales del río Ebro aguas abajo de la CH Flix está fuertemente condicionado por las centrales hidroeléctricas de Ribarroja y Flix. Así, por ejemplo, inmediatamente aguas abajo de la CH Flix a lo largo de un día se pueden dar diferencias de nivel superiores a un metro. Ello supone variaciones de caudal del 200% o mayores.

- *Capítulo 5*

En verano a la salida de los embalses, en la CH Flix el agua presenta una temperatura inferior a la que tiene a la entrada (Escatrón, Aitona, Fraga). Esa diferencia es de unos 4°C. En invierno se da una diferencia de signo contrario: al salir de los embalses el agua presenta mayor temperatura que a la entrada. Esta alteración de la temperatura del agua del río provocada por los embalses presenta un marcado ciclo anual. Los embalses también suavizan el ciclo diario de la temperatura del agua, tanto en invierno como en verano.

Aguas abajo de la CH Flix el agua tiende a recuperar su comportamiento térmico natural: se calienta en verano y se enfría en invierno. Así mismo, también recupera su ciclo diario de temperatura. Todo ello ya se hace patente en el tramo de 5.3 kilómetros comprendido entre la CH Flix y la CN Ascó.

- *Capítulo 6*

Al establecer en verano el balance térmico de una masa de agua que se traslada a lo largo del tramo CH Flix - CN Ascó, se observa que la variación de temperatura que sufre dicha masa de agua en su recorrido está en gran medida condicionada por la radiación solar de onda corta y por el intercambio de calor con el lecho. La importancia de éste último factor se pone de manifiesto al realizar el balance con intervalos temporales inferiores al día. Así, al tomar un intervalo de diez minutos queda patente el efecto regulador que el intercambio de calor con el lecho tiene sobre el comportamiento térmico de un tramo de río: el lecho gana calor durante las horas del día cuando el agua recibe la mayor potencia calórica desde la atmósfera y cede calor cuando es mayor la transmisión de calor desde el agua hacia la atmósfera.

#### **4.- FUTUROS DESARROLLOS.**

La presente Tesis es la primera de una línea de trabajo que tiene por objeto estudiar el impacto de un sistema de embalses en el comportamiento natural del río, en particular su régimen térmico.

A continuación se presentan aquellos aspectos que se entiende deben de ser priorizados en futuros estudios relacionados con el contenido de esta Tesis. Cabe indicar que la mayoría de ellos están contemplados entre los objetivos previstos de una Tesis ya iniciada.

- Extender al invierno el análisis del balance térmico aquí realizado en verano.
- Mejorar la medida de la radiación solar neta. Para ello se sugiere medir la radiación solar mediante un par de piranómetros y un radiómetro situado sobre la superficie del agua y, de este modo, obviar la incertidumbre que supone el cálculo del albedo.

- Profundizar en el estudio del intercambio de calor entre el agua y el lecho del río. Para ello se cree de interés instalar sensores de temperatura a diferentes profundidades bajo el lecho y de éste modo poder establecer las variaciones de calor almacenado en el mismo.
- Con el objeto de contrastar la metodología propuesta en esta Tesis, estudiar otros embalses en cuanto a su incidencia en el comportamiento térmico natural del río. Estos embalses también deberán estar situados en régimen de clima mediterráneo pero en regiones alejadas del Bajo Ebro.
- Estudiar el comportamiento térmico del embalse para poder analizar con rigor las causas que provocan la diferencia de temperaturas del agua entre la entrada y la salida del mismo.
- Estudiar la incidencia en las comunidades fluviales (flora y fauna) de la alteración del comportamiento térmico natural del río provocado por un embalse.

Barcelona, Febrero de 2003

Por medio de la presente quisiera agradecer el apoyo que han brindado a este proyecto durante estos años, esperando que sea de utilidad en vuestro trabajo. Muchas gracias por todo.

Atentamente

Rafael Val Segura.