

## Caracterización térmica de ríos de montaña regulados por aprovechamientos hidroeléctricos. Ejemplos del Pirineo Central

Estrella Carrero-Carralero<sup>1\*</sup> , Damián Vericat<sup>1,2</sup> , Ramon J. Batalla<sup>1,3</sup>  y Antoni Palau-Ibars<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Fluvial Dynamics Research Group (RIUS), Universitat de Lleida (UdL), Lleida, Spain.

<sup>2</sup> Forest Science and Technology Centre of Catalonia (CTFC), Solsona, Spain.

<sup>3</sup> Catalan Institute for Water Research (ICRA), Girona, Spain.

\* Corresponding author: estrella.carrero@udl.cat

Recibido: 18/01/23

Aceptado: 28/05/24

### RESUMEN

#### Caracterización térmica de ríos de montaña regulados por aprovechamientos hidroeléctricos. Ejemplos del Pirineo Central.

Los aprovechamientos hidroeléctricos alteran el régimen térmico del agua de los cursos fluviales en cuencas de montaña. Estos cambios de temperatura repercuten en numerosas variables fisicoquímicas, las cuales, a su vez, influyen en el hábitat físico de los sistemas fluviales. Dado que el régimen térmico en ríos perennes es ecológicamente significativo, se requiere un mayor conocimiento en diversas escalas temporales y espaciales. En este trabajo, se analizan los cambios observados a varias escalas temporales en el régimen térmico de dos tramos de ríos pirenaicos regulados por diferentes esquemas de aprovechamiento hidroeléctrico *i.e.* una central hidroeléctrica a pie de presa y una central con canal de derivación. Los resultados indican que las anomalías térmicas están relacionadas con el tipo de esquema de aprovechamiento. Mientras que los efectos térmicos en los esquemas de pie de presa, asociados al caudal turbinado, afectan homogéneamente a todo el tramo, en los esquemas con derivación, los efectos térmicos son diferidos, uno asociado al caudal ecológico y el otro al caudal turbinado.

**PALABRAS CLAVES:** temperatura, régimen fluvial, esquemas hidroeléctricos, efecto térmico diferido, curvas duración temperatura, oxígeno disuelto, cuencas pirenaicas.

### ABSTRACT

#### *Thermal characterization of mountain rivers regulated by hydropower schemes. Examples from the Central Pyrenees.*

*Hydroelectric facilities alter the thermal regime of water in mountain river basins. Changes in temperature have repercussions on numerous physicochemical variables, which in turn influence the physical habitat of fluvial systems. Since the thermal regime in perennial rivers is ecologically significant, more knowledge is required at various temporal and spatial scales to assess their potential effects on the fluvial environment. In this study, the changes observed in the thermal regime of two reaches of Pyrenean rivers regulated by different hydroelectric configurations (a hydropower plant “at the foot of the dam, *i.e.*, run-on-the-river”, and a hydropower plant “associated to a diversion canal, *i.e.*, run-of-the-river”) are identified and characterized at various temporal scales. Results show that thermal anomalies depend on the type of hydropower scheme; while run-on-the-river schemes homogeneously affect the entire section downstream from the dam, run-of-the-river schemes show two alterations, one associated with the ecological discharge in the by-pass reach, and the other linked to flow releases after the turbines.*

**KEY WORDS:** temperature, fluvial regime, hydroelectric schemes, delayed thermal effect, temperature duration curves, dissolved oxygen, Pyrenean River basins.

## INTRODUCCIÓN

La energía hidroeléctrica es considerada como una de las principales fuentes de energía renovable y avanzada en reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> (Zarfl *et al.*, 2015; REN21, 2022). Los aprovechamientos hidroeléctricos en España desempeñan un papel muy relevante en el sistema eléctrico nacional. Las minicentrales hidroeléctricas (<10 MW) son una de las instalaciones de producción de energía más rentables y, según la Red Eléctrica Española (<https://www.ree.es/es>), a finales de 2016 se calcula que representaban una potencia total de alrededor de 2000 MW, cuando la producción de energía hidráulica en 2021 era de 29.63 GWh. Según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (Hidroeléctricas, 2006), España ocupa el tercer lugar respecto al resto de países de la Unión Europea en cuanto a potencia instalada de minicentrales hidroeléctricas. Las minicentrales hidroeléctricas tienen diferentes tipos de configuración en función de las características fisiográficas del tramo de río donde se ubican. En general, los esquemas básicos de aprovechamiento con embalse de reserva constan de una presa, de pequeñas o medianas dimensiones, que actúa como depósito de agua y permite un cierto salto hidráulico aprovechado para turbinar un determinado caudal de diseño (Berga, 2016; Ashraf *et al.*, 2018; Schleiss, 2020). El turbinado de agua regulado puede tener lugar con la minicentral hidroeléctrica dispuesta a pie de presa (*i.e.* central a pie de presa, conocido como *run-on-the-river hydropower*) o con la minicentral ubicada a cierta distancia de la presa río abajo, donde el agua llega a través de un canal de derivación (*i.e.* central con canal de derivación, conocido como *run-of-the-river hydropower*).

La regulación del régimen hidrológico natural conlleva efectos directos sobre el ecosistema fluvial (Richter *et al.*, 1996; Bunn & Arthington, 2002). El almacenamiento de agua mediante presas genera un volumen de agua acumulado que dispone una columna de agua que puede llegar a varios metros de profundidad sujetos a la dinámica de estratificación de un embalse (*i.e.* Kittrell, 1965; Han *et al.*, 2000). En el caso de la producción de energía hidroeléctrica, el turbinado de agua se ejecuta mediante hidropuntas (*hydro-*

*peaking*), que son cambios bruscos de caudal en consonancia con la curva diaria y semanal de demanda de energía (*i.e.* Moog, 1993; Sauterleute & Charmasson, 2014). La regulación fluvial, además de alterar el caudal (*i.e.* Batalla *et al.*, 2021), modifica el régimen natural de temperaturas en los ríos (Poff & Allan, 1995; Webb, 1996; Langan *et al.*, 2001) con efectos sobre procesos físicos, biológicos y químicos en los ecosistemas asociados (LeRoy *et al.*, 1997; Stanford & Ward, 2001; Salmaso *et al.*, 2021). Dicha regulación también puede afectar a determinados usos del agua (Webb *et al.*, 2008). Las variaciones en el régimen térmico de un río tienen consecuencias también sobre las características fisicoquímicas del agua (*i.e.* densidad, solubilidad de gases, pH, conductividad eléctrica) así como sobre las comunidades naturales, a cualquier nivel trófico, y los procesos limnológicos en base a los cuales se organiza el ecosistema fluvial (Hauer *et al.*, 2017; Hayes *et al.*, 2019).

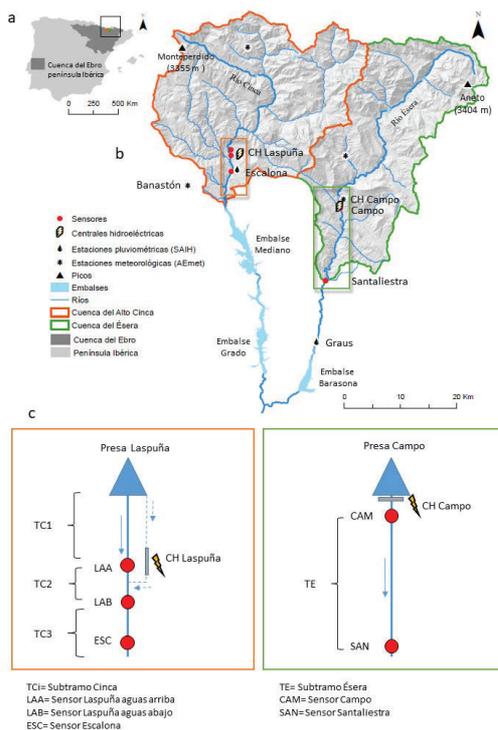
Estos han sido revisados a nivel nacional y global (*i.e.* Muñoz, 1990; De Jalón *et al.*, 1996; Harby *et al.*, 2016; Choi & Choi, 2018; Palau-Nadal *et al.*, 2018). Por una parte, la columna de agua de los embalses se estratifica térmicamente, dado que los cambios térmicos en superficie se transmiten en profundidad decrecientemente generando gradientes verticales de temperatura estacionales (Elçi, 2008; Firoozi *et al.*, 2020). Por otra parte, las hidropuntas cambian fuertemente el régimen de temperaturas diario y horario de un río y producen, de manera general, un aumento de la temperatura del agua en invierno y una disminución en verano (Fette *et al.*, 2007; Rheinheimer & Viers, 2015). El término termopunta o termopico (*termopeaking*) propuesto por Carolli *et al.* (2008) y desarrollado más adelante por Zolezzi *et al.* (2011), es un análogo de hidropunta, para indicar cambios bruscos de temperatura por las operaciones de descarga en la producción de energía hidroeléctrica. Dentro de este marco general, un escenario menos estudiado y objeto de este trabajo es el que denominamos *efecto térmico diferido*. Se refiere a cómo el desvío de una parte del caudal de un río, en este caso en el contexto de un aprovechamiento hidroeléctrico con derivación, puede afectar a la temperatura del agua del tramo comprendido entre el punto de captación y el

de retorno del caudal turbinado por la central hidroeléctrica. Este efecto, potencialmente significativo *per se*, puede agudizar la manifestación del *termopeaking* en el punto de retorno de las aguas turbinadas por la central de derivación, al posibilitar un mayor salto térmico en la zona de mezcla del caudal circulante por el río y la entrada al cauce del effluente de la central hidroeléctrica.

La comprensión de estos efectos y la definición de medidas de mitigación efectivas solo se puede lograr mediante una caracterización detallada de las alteraciones térmicas y sus relaciones causales con los efectos biológicos observados (Richter & Thomas, 2007; Moreira et al., 2019). La temperatura del agua depende de otros factores como la radiación solar, la temperatura del aire y la circulación del agua. El concepto de temperatura de equilibrio en los ríos, introducido por Edinger et al. (1968), se define como la tem-

peratura que alcanza un cuerpo de agua cuando la suma de los flujos de calor a través de la interfaz aire-agua es igual a cero (Buendía et al., 2015). La temperatura del agua está condicionada por el equilibrio con respecto a la temperatura ambiente y, a su vez, está vinculada a parámetros como la concentración de oxígeno, la conductividad o el pH en el agua (Jones, 2014; Fantin-Cruz et al., 2015; Pulg et al., 2016). Las variaciones de estos factores condicionan, por ejemplo, el número de huevos que sobreviven hasta la eclosión, así como la velocidad de desarrollo de los huevos y los alevines, el desarrollo de natación, la alimentación, la migración y los movimientos aguas arriba en peces (Casas-Mulet et al., 2015; Costa et al., 2018).

El objetivo de este estudio es identificar y caracterizar los cambios en el régimen térmico de dos ríos pirenaicos sujetos a esquemas de aprove-



**Figura 1.** (a) Localización de las cuencas del Ebro, el Cinca y el Èsera en la península Ibérica. (b) Cuencas del Alto Cinca y el Èsera con la localización de las centrales hidroeléctricas (CH), las estaciones pluviométricas del SAIH (Sistema Automático de Información Hidrológica), las estaciones meteorológicas de AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) y sensores propios. (c) Esquema descriptivo de los sistemas de producción hidroeléctrica fluyente correspondientes a la CH Laspuña, provista de una tubería de derivación, y la CH Campo de pie de presa con la localización de los puntos de muestreo de los sensores propios. (a) Location of the Ebro, Cinca and Èsera basins in the Iberian Peninsula. (b) Upper Cinca and Èsera basins with the location of the hydroelectric power plants (HP), SAIH (Automatic Hydrological Information System) rain gauge stations, AEMET (State Meteorology Agency) weather stations and own gauging stations. (c) Descriptive diagram of the hydroelectric schemes corresponding to HPP Laspuña (bypass pipe) and HPP Campo (at-the-dam), together with the location of the monitoring sites.

chamamiento hidroeléctrico diferentes: i) turbinado a pie de presa (*run-on-the-river*) y ii) turbinado río abajo a partir de una derivación (*run-of-the-river*). El estudio destaca la importancia de investigar las alteraciones térmicas a múltiples escalas temporales y espaciales para una mejor comprensión de la complejidad que caracteriza el régimen térmico de los ríos con distintos tipos de regulación. Finalmente, y de manera específica, en el caso del esquema de aprovechamiento con derivación, se discuten tanto las potenciales consecuencias del *efecto térmico diferido* sobre las características fisicoquímicas del agua (*i.e.* oxígeno), así como sus posibles repercusiones sobre las comunidades naturales acuáticas (*i.e.* peces).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

Los tramos seleccionados se encuentran en la parte alta de las cuencas de los ríos Cinca y Ésera (Pirineo Central), a una latitud y altitud similares. Los datos analizados pertenecen al año natural 2019, del que se dispone de series continuas y completas de temperatura a intervalos de 15 minutos en cinco puntos de monitorización a lo largo de los tramos de estudio (tres en el Cinca y dos en el Ésera; Fig. 1 y Tabla 1).

El tipo de aprovechamiento hidroeléctrico en

**Tabla 1.** Características técnicas de los aprovechamientos hidroeléctricos correspondientes a la central hidroeléctrica de Laspuña (Cinca) y la central hidroeléctrica de Campo (Ésera). Los datos indican el año de puesta en marcha, la potencia instalada, la producción anual, el salto bruto, el volumen del embalse, el caudal de concesión y el caudal medio turbinado. *Technical characteristics of the two hydroelectric schemes corresponding to the Laspuña Hydroelectric Plant (Cinca) and the Campo Hydroelectric Plant (Ésera). Data correspond to the year of start-up, the installed power, the annual production, the gross head, the volume of the reservoir, the concession flow and the average flow of the turbine*

| Características técnicas                   | CH Laspuña | CH Campo |
|--|------------|----------|
| Año puesto en servicio                     | 1951       | 1929     |
| Potencia instalada (MW)                    | 14.3       | 1.7      |
| Producción anual (GWh/año)                 | 55.9       | 5.4      |
| Salto bruto (m)                            | 77         | 12       |
| Volumen embalse (hm <sup>3</sup> )         | 0.35       | 0.09     |
| Caudal de concesión (m <sup>3</sup> /s)    | 21         | 20       |
| Caudal medio turbinado (m <sup>3</sup> /s) | 19         | 15.5     |

cada tramo es diferente: i) en el caso del río Cinca, el agua fluye por una tubería de derivación del caudal hasta la central y, ii) en el caso del Ésera se turbinan desde el pie de presa. Según Tena *et al.* (2023), en el Cinca se generan habitualmente dos hidropuntas por día con un rango de oscilación del caudal entre 5 y 35 m<sup>3</sup>/s, mientras que en el Ésera tiene lugar generalmente una hidropunta por día con un rango de oscilación entre 5 y 15 m<sup>3</sup>/s. Ambos aprovechamientos hidroeléctricos están compuestos de una presa que genera un depósito de agua, donde la columna de agua se estratifica térmicamente en profundidad, lo que da lugar a un efecto térmico amortiguador en las zonas inferiores que es desde donde se deriva el agua.

Los tramos de estudio están subdivididos en subtramos (Fig. 1 y Tabla 2) sujetos a diferentes escenarios térmicos:

(a) El tramo del río Cinca tiene una longitud de 8.5 km, desde la presa de Laspuña hasta la estación de aforo de Escalona (ESC), propiedad de la Confederación Hidrológica del Ebro (CHE; estación A051), con la central hidroeléctrica (CH) de Laspuña situada 5 km aguas abajo de la presa de Laspuña. Este tramo se subdivide en tres subtramos delimitados por los tres puntos de monitorización, según se muestra en la figura 1 y la Tabla 2. Parte del agua del embalse de Laspuña se conduce a la central hidroeléctrica mediante una tubería de derivación aislada, de manera que entre la presa de Laspuña y aguas arriba del canal de salida de agua turbinada de la CH Laspuña (TC1) el río está sujeto únicamente al régimen de caudal ecológico (*i.e.* 5 m<sup>3</sup>/s) y a las crecidas naturales, mientras que aguas abajo de la central hidroeléctrica (TC2 y TC3) el río experimenta el régimen de turbinado de la citada central (hidropuntas), además del caudal ecológico y las crecidas naturales.

(b) El tramo del río Ésera tiene una longitud de 18.5 km, desde la presa de Campo y la central del mismo nombre ubicada al pie, hasta la localidad de Santaliestra. En este caso, se ha establecido un único subtramo de estudio a partir de dos puntos de monitorización, como se observa en la figura 1 y la Tabla 2. El agua embalsada se turbinan directamente a pie de presa, de modo que todo el subtramo (TE) es sometido al régimen de turbinado

**Tabla 2.** Resumen de los principales descriptores geográficos de los subtramos de estudio correspondientes a los ríos Cinca (TC) y Ésera (TE). Rango de altitud (m s. n. m.), longitud de los subtramos (km), límite de subtramos aguas arriba y límite de subtramo aguas abajo. *Summary of the main geographical descriptors of the study subsections corresponding to the Cinca (TC) and the Ésera (TE) rivers. Altitude range (m a. s. l.), length of the subsection (km), and limits of upstream and downstream subsections.*

| Ríos  | Subtramos | Rango altitud (m s. n. m.) | Longitud (km) | Límite aguas arriba | Límite aguas abajo |
|-------|-----------|----------------------------|---------------|---------------------|--------------------|
| Cinca | TC1       | 669 a 602                  | 5             | Embalse de Laspuña  | Sensor LAA         |
|       | TC2       | 602 a 601                  | 0.5           | Sensor LAA          | Sensor LAB         |
|       | TC3       | 601 a 567                  | 3             | Sensor LAB          | Sensor ESC         |
| Ésera | TE        | 677.5 a 540                | 18            | Sensor CAM          | Sensor SAN         |

de la CH Campo, además del caudal ecológico y las crecidas naturales.

### Fuente y análisis de datos

#### *Caracterización del régimen hidrológico*

Previamente al análisis del régimen térmico de los dos tramos de río considerados, y para contextualizar los resultados de temperatura, se ha llevado a cabo una caracterización hidrológica a partir de registros históricos de caudal. Los datos se han obtenido del Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH-Ebro) de la CHE (<http://www.saihebro.com/saihebro/index.php>). También se ha dispuesto de los registros del anuario de aforos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) ([https://ceh.cedex.es/anuarioaforos/afo/estaf-mapa\\_gr\\_cuenca.asp](https://ceh.cedex.es/anuarioaforos/afo/estaf-mapa_gr_cuenca.asp)). Las series de datos analizadas corresponden a las aportaciones anuales ( $\text{hm}^3/\text{año}$ ) de los años hidrológicos comprendidos entre 1959 y 2019 en el Cinca (A051) y desde 1949 hasta 2019 en el Ésera (estación de aforo de Graus A013, ubicada 14 km aguas abajo de la localidad de Santalies-tra). A partir de esta información, se han adoptado los criterios de clasificación de caudales basados en percentiles propuestos por Martínez & Fernández (2010) y se han generado curvas de frecuencia acumuladas para caracterizar el tipo de año; húmedo, intermedio o seco (a partir de los percentiles 25, 50 y 75). Los resultados hidrológicos se han contrastado con los registros de precipitaciones anuales acumuladas (2002-2020) en las estaciones pluviométricas de Escalona (A051) y Campo (A258) disponibles también en el SAIH para corroborar la coherencia de las tendencias observadas.

#### *Caracterización del régimen térmico*

Se dispone de registros de temperatura del agua en las estaciones LAA, LAB y ESC en el río Cinca y, CAM y SAN en el río Ésera (ver Fig. 1 y Tabla 2 para más detalles sobre localización). La elección del año 2019 responde a los análisis previos realizados sobre la calidad de los datos (continuidad de registros) y su representatividad hidrológica, además del solapamiento de datos entre las dos cuencas de estudio, lo que permite abordar el objetivo general del trabajo: caracterización del régimen térmico de dos ríos de montaña afectados por aprovechamientos hidroeléctricos diferentes.

El sistema de monitorización de temperatura en cada estación se compone de un sensor de presión y temperatura del agua (Levellogger®) (<https://www.solinst.com/products/dataloggers-and-telemetry/3001-levellogger-series/levellogger-junior/>) programado para obtener datos de nivel y temperatura del agua cada quince minutos; en el caso de la temperatura, dentro del rango de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  y con precisión  $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La distribución de las estaciones monitorizadas aporta una perspectiva de la variabilidad espacial de la temperatura en los tramos analizados.

Cabe indicar que no se dispone de datos de la temperatura del agua en la presa de Laspuña (río Cinca). El agua turbinada que llega a LAB es derivada desde la mitad inferior de la columna de agua de la presa de Laspuña mediante una conducción a presión, por la que el agua fluye por un tubo en superficie a alta velocidad y aislada del ambiente exterior hasta la CH Laspuña, donde es turbinada. Se considera que los cambios térmicos ocasionados por la fricción en el turbinado no alteran de forma apreciable la temperatura del agua turbinada *i.e.* el valor registrado en la esta-

**Tabla 3.** Resumen de los datos agregados correspondientes a los registros quinceminutales de las estaciones monitorizadas en el río Cinca y Ésera en el año 2019. Se incluye la media (°C), los valores mínimos y máximos (°C), la amplitud (máximo-mínimo) (°C), el coeficiente de variación y el día juliano de mayor y menor temperatura (días), tasa media de cambio temporal (°C/día) y la tasa de cambio longitudinal (°C/m). *Summary of the aggregated data corresponding to the fifteen-minute records of the stations monitored in the Cinca and Ésera rivers in 2019. It includes the mean (°C), the minimum and maximum values (°C), the amplitude (maximum-minimum) (°C), the variation coefficient and the Julian day of highest and lowest temperature (days), temporal change rate (°C/day) and longitudinal rate of change (°C/m).*

| Estación |                | Temp. Media (°C) | Temp. máx. (°C) | Temp. mín. (°C) | Amplitud térmica (°C) | CV (%) | Día juliano temp. máx. | Día juliano temp. mín. | Tasa día (°C/día) | Tasa Long. (°C/m) | SubTramos |
|----------|----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|--------|------------------------|------------------------|-------------------|-------------------|-----------|
| Cinca    | Presas Laspuña | 9.33*            | 15.67*          | 3.45*           | 12.22*                | 35.34* | -                      | -                      | -                 | 0.0002            | TC1       |
|          | LAA            | 11.56            | 19.89           | 3.55            | 16.34                 | 41.74  | 261                    | 35                     | 0.0723            | -0.0046           | TC2       |
|          | LAB            | 9.33             | 15.67           | 3.45            | 12.22                 | 35.34  | 261                    | 35                     | 0.0541            | 0.00085           | TC3       |
|          | ESC            | 11.88            | 17.69           | 3.79            | 13.9                  | 37.4   | 261                    | 35                     | 0.0615            | -                 | -         |
| Ésera    | CAM            | 9.93             | 17.79           | 3.54            | 14.25                 | 39     | 223                    | 16                     | 0.0684            | 0.000056          | TE        |
|          | SAN            | 10.95            | 20.97           | 1.82            | 19.15                 | 42.12  | 221                    | 12                     | 0.0916            | -                 | -         |

\*Se considera que los cambios térmicos ocasionados por la fricción en el turbinado no alteran de forma apreciable la temperatura del agua turbinada i.e. el valor registrado en la estación de LAB es prácticamente equivalente al de la temperatura del agua en el pie de la presa de Laspuña, medida durante la caracterización térmica longitudinal del tramo de río sometido al efecto térmico diferido.

ción LAB es prácticamente equivalente al de la temperatura del agua en el pie de la presa de Laspuña, medida durante la caracterización térmica longitudinal del tramo de río sometido al efecto térmico diferido (ver Tabla 3).

La caracterización del régimen térmico en este estudio se basa en el análisis de distintos descriptores estadísticos básicos de centralidad y de dispersión (rangos, medias aritméticas y desviación estándar). Los datos de temperatura se agregan a escala diaria, mensual y anual en función de cada tipo de análisis. También se han calculado descriptores de frecuencia y distribución (percentiles), así como de tendencia de variación (coeficientes y tasas de variación) por regresión lineal. De manera específica, el análisis se realiza en base a cuatro agrupaciones de parámetros cuyas variables son de relevancia ecológica: régimen térmico atmosférico, rango térmico diario, variabilidad intermensual y duración anual.

### Régimen térmico atmosférico

Los registros de temperatura del agua se han correlacionado con los datos de temperatura am-

biental más próximos disponibles; en concreto, con los de la estación meteorológica que la Agencia Estatal de Meteorología de España (AEMET) tiene en Banastón (Huesca), ubicada a 5 km en línea recta (dirección suroeste) desde la estación de ESC y 10 km (dirección noroeste) desde la estación de SAN. Esta estación meteorológica, por su localización geográfica altitudinal y latitudinal, se ha considerado adecuada como referencia de la temperatura atmosférica, para los dos tramos de río considerados, como se observa en la figura 1. Con estos datos, se ha calculado mediante regresión lineal la relación de la temperatura media diaria del agua con la temperatura media diaria ambiental de Banastón. La regresión lineal entre la temperatura del agua y la temperatura del aire sirve para valorar la influencia térmica atmosférica sobre la masa de agua mediante los parámetros de pendiente y ordenada en el origen.

### Rango térmico diario

El rango térmico diario se refiere a la amplitud de las variaciones temporales y espaciales de temperatura, como aspecto condicionante, tanto de

la fisicoquímica del agua, como de la dinámica ecológica de las comunidades naturales acuáticas (Brizga et al., 2001). Además de la máxima amplitud, se han calculado las tasas máximas de variación temporal y espacial de la temperatura del agua, en los dos tramos de río considerados. Dichas tasas expresan, la máxima amplitud de variación por unidad de tiempo (día) y longitud (metros). Se ha llevado a cabo un análisis comparativo a partir de los registros de temperatura diarios en el Cinca y el Ésera. Los datos de temperatura del agua incluyen la media (°C), los valores mínimos y máximos (°C), la amplitud (máximo-mínimo) (°C) y el coeficiente de variación y muestran los días julianos de mayor y menor temperatura (días), tasa de cambio máxima temporal (°C/día) y tasa de cambio máximo longitudinal (°C/m).

#### Variabilidad intermensual

La distribución intermensual de las temperaturas actúa, junto con la disponibilidad de luz y el caudal circulante, regulando en gran medida los ciclos biológicos de las especies acuáticas. Su cuantificación se ha llevado a cabo a partir de la variación secuencial de la temperatura (VST). Se trata de un parámetro que se presenta en *Indicators of Hydrologic Alteration* (IHA; Richter et al., 1997) para el caudal. Para este estudio se ha adaptado a los datos de temperatura y a escala mensual, lo que permite cuantificar los incrementos relativos de temperatura medios entre dos meses consecutivos:

$$VST = \frac{(T \text{ media mes } (i + 1)) - (T \text{ media mes } (i))}{T \text{ media mes } (i)}$$

La relación entre estos incrementos de temperatura intermensuales y temperatura media mensual permite representar el ciclo térmico anual de cada estación de medición. La representación de esta relación define un área, cuyas dimensiones son características de la amplitud térmica anual en cada una de las zonas de estudio, así como de su tasa de cambio de temperatura de un mes a otro. La comparación de dichas áreas permite identificar escenarios térmicos distintos entre los subtramos estudiados.

#### Duración anual

La ocurrencia y la persistencia de las temperaturas a lo largo de un ciclo anual es otro factor que condiciona las características fisicoquímicas del agua (Prats et al., 2012) y algunos de los ciclos biológicos de las especies acuáticas, así como determinados procesos específicos en macroinvertebrados bentónicos (Bruno et al., 2013) y también el desarrollo embrionario en peces (Crisp, 1996). El análisis de duración en las series de registros de temperatura se ha realizado mediante *curvas de duración de temperaturas*, que muestran el porcentaje de tiempo en el que una determinada temperatura es igualada o excedida. A partir de estos datos se ha calculado el Índice de Variabilidad de Temperatura (IVT), adaptado de Batalla et al. (2004). La expresión de cálculo utilizada opera con los siguientes percentiles de referencia:  $T_5$ ,  $T_{16}$ ,  $T_{50}$ ,  $T_{84}$  y  $T_{95}$ , que se corresponden respectivamente con los valores de temperatura igualados o superados durante el 5 %, el 16 %, el 50 %, el 84 % y el 95 % de los días del año.

$$|IVT| = \left| \frac{(T_{84} - T_{16}) + (T_{95} - T_5)}{T_{50}} \right|$$

El valor de este índice (en valor absoluto) es mayor cuando la variabilidad térmica es más alta y viceversa.

#### *Campañas de campo: datos térmicos adicionales.*

A partir de los análisis preliminares realizados en el río Cinca y dada la mayor complejidad de su esquema de aprovechamiento hidroeléctrico, se realizaron campañas de campo (C1: 13/08/2021 y C2: 09/02/2022) en este río para la caracterización térmica adicional de los registros del año 2019. Estas campañas permitieron la caracterización de variabilidad térmica del agua a lo largo del tramo de estudio del Cinca (Fig. 1).

En la primera campaña de agosto de 2021 se hicieron dos recorridos a distintas horas del día con el fin de establecer la variación térmica intradiaria (C1.1 de 9:00 a 11:00 horas y C1.2 de 18:00 a 20:00 horas). En la segunda, la campaña de febrero de 2022, se realizó un único recorrido

(C2 de 10:00 a 12:00 horas) debido a que se juzgó poco o nada significativa la variación térmica intradiaria a partir de los datos obtenidos en los sensores fijos de registro quinceminutal (<10 %). Se procedió a recorrer el tramo de estudio tomando datos con una sonda multiparamétrica YSI-EXO® (precisión de  $\pm 0.2$  °C), desde el pie de presa de Laspuña hasta la estación de aforo de Escalona. Se registró la temperatura del agua en tres puntos de cada sección transversal (margen derecho, centro del cauce y margen izquierdo), con intervalos de separación entre secciones de entre 500 y 700 m. Para asegurar la comparabilidad de los datos, las campañas de muestreo se desarrollaron bajo estrategias similares respecto a la duración (2 horas), al caudal circulante (ca.  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y a la distribución de puntos de muestreo de registros de temperatura. En total se obtuvieron observaciones en 13 secciones en cada campaña, con un total de 117 puntos de medidas de temperatura.

#### *Cálculos complementarios*

Además, se han calculado, a partir de las series de registros automáticos quinceminutales de temperatura, valores de concentración de oxígeno disuelto a saturación según la expresión de Mortimer (1981):

$$\ln[\text{O}_2] = 7.7117 - 1.31403 \cdot \ln(t + 45.93) + 5.25 \cdot \ln(1 - h/44.3)$$

Siendo  $t$  la temperatura del agua (°C) y  $h$  la altitud sobre el nivel del mar (km). Cabe indicar que en los puntos de control automático de temperatura (LAA, LAB y ESC; Fig. 1), el buen estado ecológico de la masa de agua permite suponer, con poco margen de error, una escasa desviación del contenido de oxígeno disuelto en relación con el valor correspondiente a la concentración de equilibrio con la atmósfera (100 % saturación). La interpretación ecológica de los cambios en la concentración de oxígeno disuelto, potencialmente asociados a los máximos gradientes térmicos observados, es forzosamente especulativa, dado que no hay información causal disponible que permita alcanzar conclusiones definitivas al respecto.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Hidrología

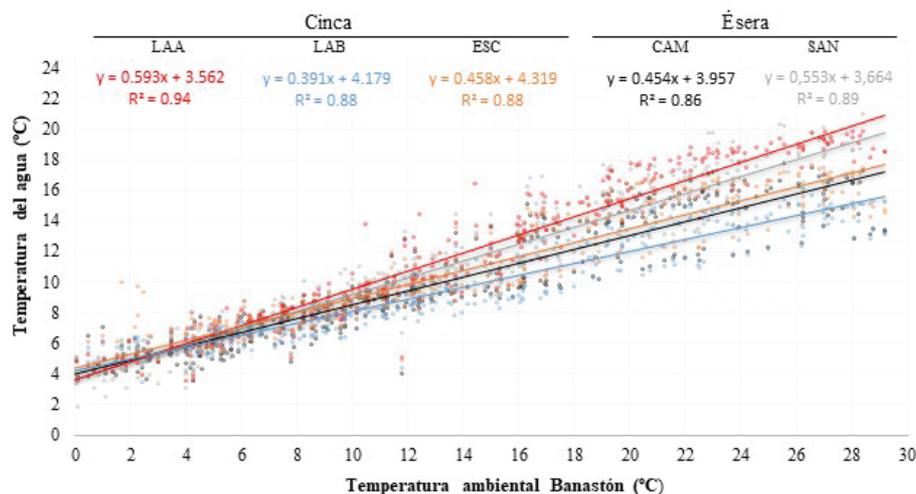
El régimen hidrológico de los tramos de estudio sigue un patrón nivopluvial, con los caudales mayores en primavera como consecuencia del deshielo y en otoño, producto de las precipitaciones. En el caso del río Cinca, para los registros pluviales (1959 a 2019) en la estación de aforo de Escalona y según indican Martínez & Fernández (2010), el percentil correspondiente al 25 % como año húmedo se establece a partir de  $1095 \text{ hm}^3/\text{año}$  y el percentil 75 % correspondiente a años secos es de  $599 \text{ hm}^3/\text{año}$ . La aportación anual de 2019 fue de  $732 \text{ hm}^3$  y por tanto se define como un año intermedio. Este valor, es algo inferior al valor correspondiente al percentil 50 equivalente a un año intermedio ( $817 \text{ hm}^3/\text{año}$ ) de las aportaciones del periodo de referencia. En el caso del río Ésera, el percentil correspondiente al 25 % es de  $726 \text{ hm}^3/\text{año}$  y el percentil 75 % es de  $474 \text{ hm}^3/\text{año}$ , medidos en la estación de aforo de Graus. La aportación anual del 2019 fue de  $597 \text{ hm}^3/\text{año}$ , correspondiente también a un año intermedio. En este caso, este valor es ligeramente por encima ( $553 \text{ hm}^3/\text{año}$ ) de la aportación media anual del periodo 1949-2019.

Los datos de las aportaciones anuales se han comparado con las tendencias en las precipitaciones en el Cinca y en el Ésera. Para el periodo comprendido entre 2002-2020, la precipitación media anual ha sido de 819 mm y 822 mm, respectivamente. En el año de estudio (2019) se alcanzaron los 776 mm en la cuenca del Cinca y los 813 mm en la del Ésera, resultados ambos en consonancia con los obtenidos en la caracterización hidrológica antes presentada y con los resultados obtenidos por Tena *et al.* (2023).

### Régimen térmico

#### *Régimen térmico atmosférico*

La estación meteorológica de Banastón, ubicada latitudinal y altitudinalmente entre los dos tramos de río, presentó en 2019 un rango térmico entre  $-1.4$  °C y  $29.9$  °C y la temperatura ambiental de Banastón se correlaciona linealmente y de mane-



**Figura 2.** Temperatura media diaria de las estaciones correspondientes al río Cinca (LAA, LAB y ESC) y el río Ésera (CAM y SAN) en correlación con la temperatura ambiental registrada en Banastón en el año natural 2019. *Average daily temperature of the stations corresponding to the Cinca river (LAA, LAB and ESC) and Ésera river (CAM and SAN) in relation to air temperature recorded in Banastón in 2019.*

ra estadísticamente significativa (Fig. 2) con la temperatura del agua registrada en el Cinca y el Ésera. En la figura 2 se observa que en el Cinca la estación cuya temperatura del agua se correlaciona más con los cambios de la temperatura ambiental es LAA ( $R^2=0.94$ ), en comparación con LAB y ESC ( $R^2=0.88$ ).

Globalmente, la temperatura del agua en el conjunto del tramo estudiado en el Cinca en relación con la temperatura ambiental (Fig. 2) responde a dos hechos que operan de forma antagónica: i) Por un lado, el caudal circulante por el río desde el pie de presa hasta la central se ve reducido al caudal ecológico, con la consecuente minoración de la profundidad y la velocidad del agua, lo que determina una más rápida transición hacia la temperatura de equilibrio (LAA). ii) Por otro lado, las aguas que circulan desde la presa hasta la central hidroeléctrica lo hacen por una conducción aislada, de manera que mantienen en verano una temperatura más baja y estable que las que llegan por el río hasta el punto de retorno de la CH Laspuña, expuesta al ambiente (LAB). En invierno, por el contrario, debido a su inercia térmica, la temperatura del agua del embalse (y por tanto del agua que pasa por la tubería) tiende a ser mayor que la temperatura del agua que llega por el río, como muestran los perfiles longitudinales. Tras el retorno del caudal turbinado al canal prin-

cipal, en el trayecto aguas abajo de la confluencia, durante el proceso de mezcla y homogeneización de aguas térmicamente diferentes, se tiende de nuevo al equilibrio térmico del caudal circulante por el río con la temperatura ambiente en Escalona (ESC).

Los estudios que evalúan alteraciones térmicas en ríos y arroyos generalmente basan sus conclusiones en las secciones aguas abajo de la alteración (*i.e.* Raddum et al., 2008; Prats et al., 2012). En este caso de estudio se destacan estas alteraciones térmicas aguas arriba, comunes en centrales hidroeléctricas con derivación de caudal, pero que pasan desapercibidas en estudios sobre *termopeaking*, que solo consideran las aguas turbinadas aguas abajo. Aguas arriba del turbinado se define un *efecto térmico diferido* que puede tener consecuencias limnológicas observables, persistentes y trascendentes (Auer et al., 2017; Kelly et al., 2017). Además, la temperatura de equilibrio en este subtramo (TC1) debido al bajo caudal representa de manera más precisa los mecanismos que afectan la temperatura del agua, ya que abarca todas las transferencias de calor a través de la interfaz aire-agua (Caissie et al., 2005). Según Kuhn et al. (2021), las diferencias térmicas medias entre meso hábitats fluviales sombreados y expuestos al sol es de hasta 1 °C, lo que confirma que la exposición a la radiación son determinantes

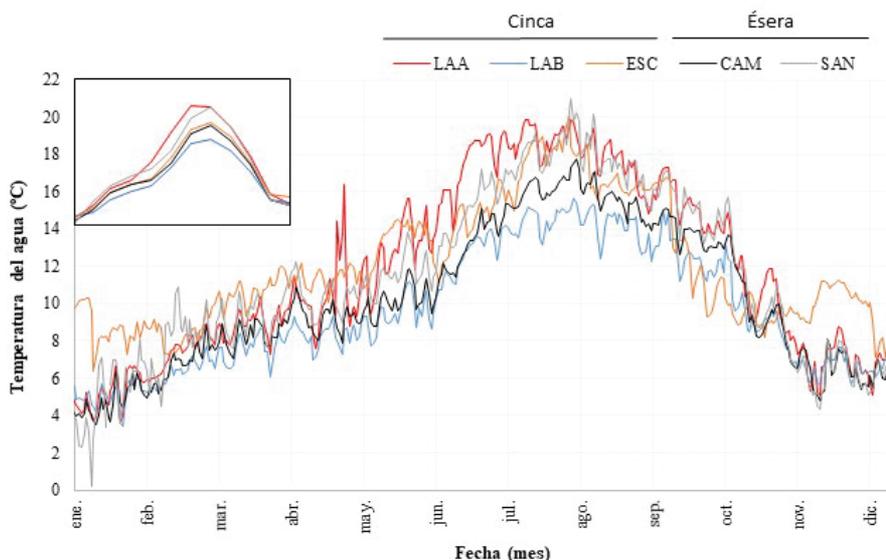
en la variabilidad térmica observada, pero en este caso, además, las variaciones de caudal en cada uno de los subtramos definidos. Estas diferencias térmicas observadas en la zona de confluencia de descarga de hidropuntas son similares a las observadas por Mejía *et al.* (2020) en las confluencias de ríos principales con afluentes, donde las diferencias de temperatura pueden llegar a oscilar hasta 4.8 °C.

En el caso de las estaciones del Ésera, la estación cuya temperatura del agua se correlaciona más con los cambios de la temperatura ambiental es SAN ( $R^2=0.89$ ). El caudal desde el pie de presa hasta aguas abajo transcurre por el cauce principal. La figura 2 muestra las diferencias entre la temperatura del aire y la temperatura del agua de las estaciones CAM y SAN. Las diferencias de la relación de temperatura del aire y temperatura del agua entre las dos estaciones son debidas, potencialmente, a la diferente distancia desde la presa. Cerca de la presa, la temperatura del agua depende sobre todo de la temperatura del agua en el embalse, y dada la inercia térmica de la misma, la pendiente de la relación es menor. A medida que el agua se desplaza aguas abajo, la temperatura del agua se acerca a la temperatura ambiental, y la pendiente de la relación y el coeficiente de

correlación aumentan. Según Prats *et al.* (2010) cuanto mayor es la descarga y mayor es la diferencia de temperatura del agua, más tiempo tarda la temperatura del agua en volver a alcanzar el equilibrio.

#### *Rango térmico diario*

En el río Cinca, como se observa en la Tabla 3, la amplitud de variación de la temperatura es 4 °C mayor en LAA respecto a aguas arriba de la CH Laspuña y LAB y de 2 °C en relación con ESC, en los que la variabilidad térmica observada fue más baja. La temperatura media anual del agua en LAA es 2 °C superior a la registrada en LAB, especialmente en los meses de verano (4 °C superior), y solo es inferior en los meses de invierno (<1 °C inferior), lo que proporciona una mayor amplitud térmica. Aguas abajo es interesante destacar que en ESC el río tiende a *recuperar* una temperatura media similar a la de aguas arriba de la CH Laspuña, en los meses de verano e invierno, lo que puede guardar relación con la formación de estancamientos de agua debido a las condiciones de mayor anchura del valle, cambios de pendiente y del cauce fluvial y por tanto menor velocidad del flujo, bajo condiciones del menor

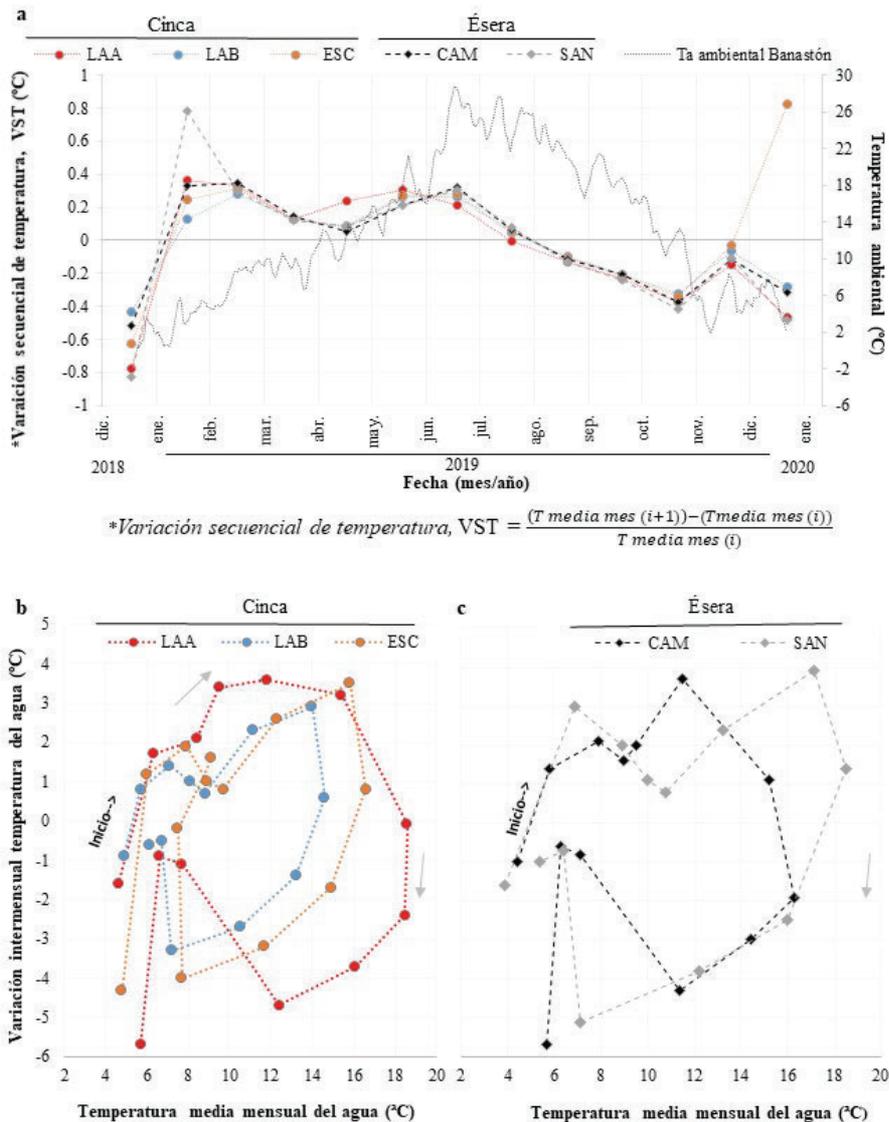


**Figura 3.** Temperatura media diaria del agua en las estaciones correspondientes de los ríos Cinca (LAA, LAB y ESC) y Ésera (CAM y SAN) en el año 2019. El gráfico encajado o secundario representa la temperatura media mensual de las series. *Average daily temperature along the Cinca (LAA, LAB and ESC) and Ésera (CAM and SAN) rivers in 2019. Additional graph of monthly average temperature of the series.*

caudal circulante. Los máximos y mínimos tienen lugar en los meses de septiembre y febrero en los tres puntos (Fig. 3).

En el río Ésera, la amplitud de variación de temperatura del agua en el subtramo (TE) refleja el efecto de las aguas que circulan desde el pie de la presa de Campo hasta 12 km aguas abajo en

Santaliestra (Tabla 3) de modo que es en torno a 5 °C superior en la estación de CAM respecto a la estación de SAN. El comportamiento térmico del caudal en el subtramo TE refleja su tránsito desde el origen en CAM hasta SAN, de manera que los cambios observados aguas abajo en SAN tienden hacia una temperatura de equilibrio con la



**Figura 4.** (a) Variación secuencial de temperatura (VST), donde muestra las tasas de variación intermensual sobre temperaturas medias mensuales correspondientes al año 2019 en las estaciones de río Cinca y Ésera relacionadas con la temperatura ambiental en Banastón (ver la figura 1 de detalles de localización). (b) Ciclo térmico anual durante 2019 en las estaciones del río Cinca. (c) Ciclo térmico anual durante 2019 en las estaciones del río Ésera. (a) *Sequential Temperature Variation (STV)* where it shows the intermonth variation rates on average monthly temperatures corresponding to the year 2019 in the stations of Cinca and Ésera related to the environmental temperature in Banastón (see figure 1 for location details). (b) *Annual thermal cycle in 2019 in the river Cinca monitoring sites.* (c) *Annual thermal cycle in 2019 in the river Ésera monitoring sites.*

atmósfera, como se ve reflejado en la tasa de cambio de temperatura longitudinal entre estaciones. En la estación de CAM el registro de temperatura media es 1 °C inferior con respecto a la temperatura media en SAN. El agua desde el origen en el pie de presa está en contacto con la temperatura ambiente en su recorrido hasta SAN. Cabe destacar que la temperatura media de los meses de marzo-abril (primavera) y octubre-noviembre (otoño) es similar a la temperatura media anual en ambas estaciones, y ambas presentan temperaturas similares. Los máximos y mínimos tienen lugar en los meses de agosto y enero en ambos puntos (Fig. 3).

Cabe añadir que las diferencias de temperatura del agua entre las estaciones de muestreo comparadas se manifiestan principalmente en los intervalos de temperaturas más elevadas y por tanto se pueden asociar al periodo estival, durante los meses más cálidos.

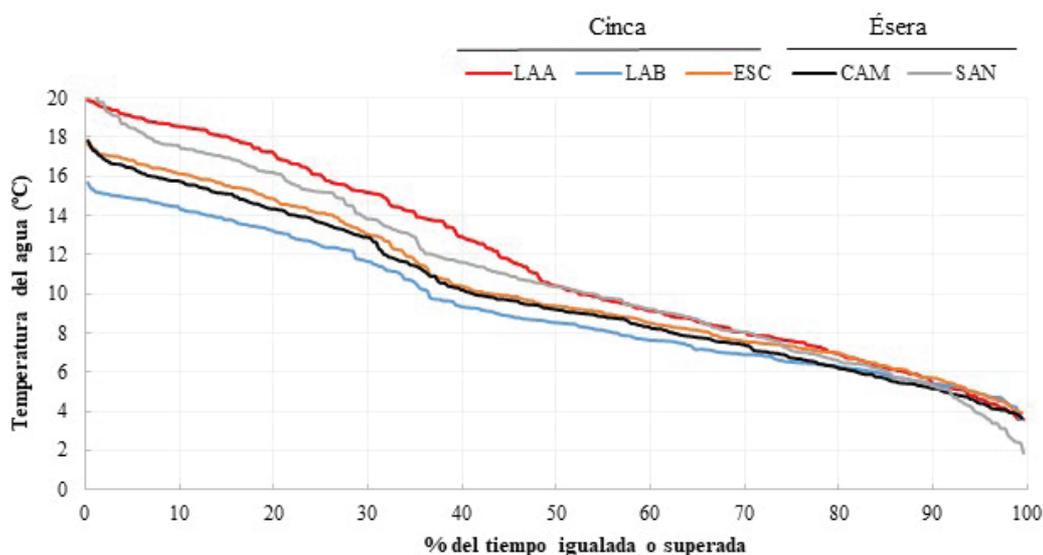
#### *Variabilidad intermensual*

En el río Cinca, la máxima variación térmica entre estaciones de muestreo se da entre enero y julio y la mínima variación, entre julio y enero para los tres subtramos. La variación es próxima a cero en abril, cerca del máximo y del mínimo anual (Fig. 4a). Se aprecia también que la fase de calentamiento es más dilatada (7-8 meses, de enero a julio) que la de enfriamiento. Finalmente, los datos indican que las tasas de variación absolutas de la temperatura media de un mes a otro son diferentes en las tres estaciones de muestreo consideradas, lo que indica que su balance térmico es distinto. Este comportamiento se puede explicar por las condiciones de caudal ecológico sostenido observado en el subtramo TC1, que implica un caudal bajo más susceptible de seguir las variaciones térmicas ambientales en comparación con las estaciones de aguas abajo. En este caso, las aguas circulantes por las estaciones de LAB y ESC tienen un patrón de comportamiento parecido y menos variable, lo que se justifica por el hecho de que el caudal turbinado (LAB) es el dominante en el subtramo TC2 y algo más intermedio en subtramo de tránsito hasta la estación de ESC (TC3), donde además tiene lugar la aportación del afluente Bellos (área de la cuenca:

182.1 km<sup>2</sup>; aportación media anual: 90 hm<sup>3</sup>/año), hecho que ejerce probablemente cierta influencia, aunque leve. El ciclo térmico anual en el Cinca (Fig. 4b), en la estación LAA es claramente más amplio que el observado en las estaciones de medición aguas abajo (LAB y ESC) que presentan un comportamiento térmico menos amplio en términos de variación intermensual de la temperatura media del agua y por tanto menos variable. Se aprecia por tanto un cambio evidente en el ciclo térmico desde la estación de LAA a la estación de LAB, que se concreta en una reducción de la amplitud térmica anual, así como de la tasa de variación intermensual de la temperatura del agua. El ciclo térmico de la estación de ESC queda en una situación intermedia entre LAA y LAB, con ciertas excepciones en los meses junio-julio y noviembre-diciembre, lo que significa que en la estación de ESC el río recupera amplitud de variación térmica. Por tanto, puede interpretarse como una tendencia a la normalización (*i.e.* temperatura de equilibrio) tras el efecto térmico producido por las aguas turbinadas de la CH Laspuña.

En el río Ésera, la tendencia de las aguas circulantes tiene un patrón de comportamiento parecido entre las dos estaciones (CAM y SAN): el caudal turbinado es determinante en la estación de CAM y condiciona también la temperatura en la estación de SAN (Fig. 4a). Cabe destacar que el agua fluye desde CAM hasta SAN en contacto con la atmósfera hasta SAN y tiende progresivamente hacia la temperatura de equilibrio a lo largo de su recorrido. Los afluentes existentes entre las estaciones de CAM y SAN, Rialbo (74.7 km<sup>2</sup>), Bacamorta (30.4 km<sup>2</sup>) y Foradada (13.3 km<sup>2</sup>), son ríos naturales de carácter intermitente y escaso caudal, hecho que probablemente no afecta sustancialmente el gradiente térmico longitudinal descrito. En el ciclo térmico anual, en el caso del Ésera (Fig. 4c), el área representativa de la amplitud de variación térmica de la estación de CAM queda comprendida dentro de la correspondiente a la estación de SAN, mostrando una tendencia creciente aguas abajo.

El ciclo anual tanto en el subtramo TC3 del Cinca, como en de TE del Ésera, se ajusta a una tendencia creciente similar donde hay mayor variabilidad en la estación de aguas abajo respecto a la de aguas arriba. Esta tendencia, sin embargo, es



**Figura 5.** Figura 5. Curva de duración de temperatura acumulada registrada durante el año de estudio en cada una de las estaciones del Cinca y el Ésera. *Cumulative frequency of the temperatures recorded during the year and at Cinca and Ésera stations.*

opuesta a la observada entre los subtramos TC1 y TC2 del Cinca, lo que enfatiza las diferencias de comportamiento térmico de uno y otro río, de acuerdo con el distinto esquema de aprovechamiento hidroeléctrico existente en cada caso.

*Duración anual*

En el río Cinca en la estación de LAA, se dio durante el 49 % del año de estudio una temperatura

igual o superior al promedio de la temperatura del conjunto de estaciones del tramo (10.9 °C), mientras que en la estación de ESC fue un 48 % y en estación de LAB, un 34 % (Fig. 5). De acuerdo con los resultados obtenidos, las tres secciones comparadas ofrecen condiciones térmicas discontinuas para el desarrollo de las comunidades naturales acuáticas. Observando el percentil 50 se reiteran las diferencias: en LAA se sitúa en torno a 2 °C superior a LAB y 1 °C respecto a ESC. Las

**Tabla 4.** Resumen de los datos agregados correspondientes a los registros quinceminutales de las estaciones monitorizadas en el río Cinca y Ésera en el año 2019. Se incluyen los percentiles 5, 10, 16, 50, 84, 90 y 95 y el valor de la curva de duración de temperatura (IVT, °C). *Summary table of the aggregate data corresponding to the fifteen-minute record of the stations monitored in the Cinca and Ésera rivers in 2019. It includes the percentiles 5, 10, 16, 50, 84, 90 and 95 and the value of the temperature duration curve (IVT, °C).*

|       | Estación | P5    | P10   | P16   | P50   | P84  | P90  | P95  | IVT * |
|-------|----------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|
| Cinca | LAA      | 19.08 | 18.55 | 17.86 | 10.38 | 6.29 | 5.39 | 4.59 | 2.51  |
|       | LAB      | 14.88 | 14.31 | 13.67 | 8.54  | 6.03 | 5.42 | 4.94 | 2.06  |
|       | ESC      | 16.85 | 16.16 | 15.46 | 9.38  | 6.42 | 5.68 | 4.89 | 2.24  |
| Ésera | CAM      | 16.38 | 15.7  | 14.93 | 9.16  | 5.73 | 5.13 | 4.4  | 2.31  |
|       | SAN      | 18.44 | 17.41 | 16.81 | 10.32 | 6.18 | 5.2  | 3.86 | 2.44  |

$$*|IVT| = ((T84 - T16) + (T95 - T5)) / T50$$

diferencias térmicas se concretan cuando las temperaturas son iguales o superiores a los 6 °C (Fig. 5). Las secciones donde se alcanzan temperaturas más elevadas presentan mayor variabilidad, observándose el mayor valor de  $|IVT|$ , de 2.51, en el subtramo TC1, la mínima variabilidad en el subtramo TC2, con un valor de  $|IVT|$ , de 2.06 y, un valor intermedio de  $|IVT|$ , de 2.24, en el subtramo TC3 (Tabla 4).

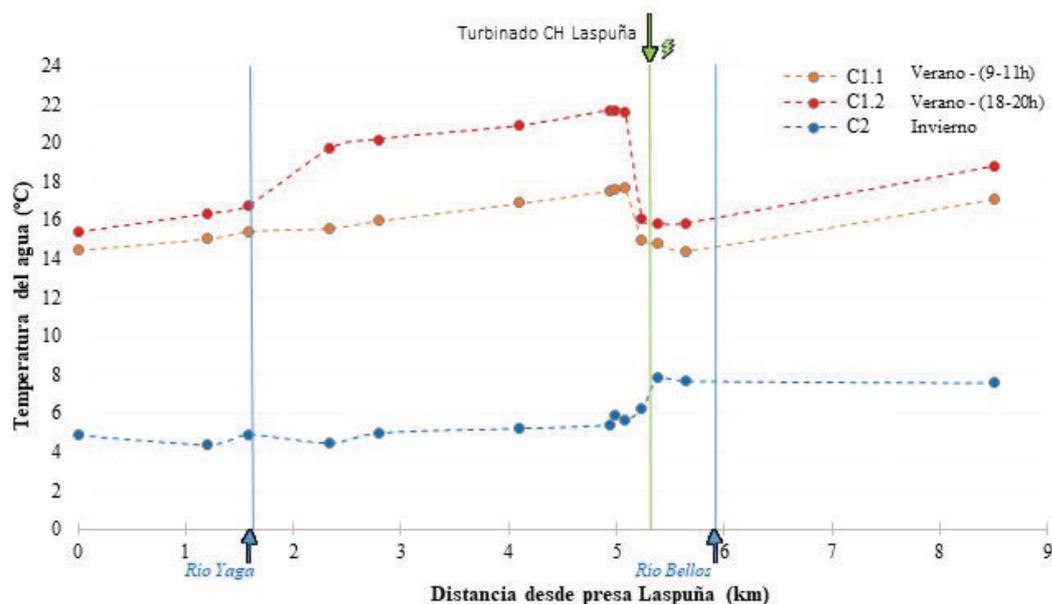
En el río Ésera en la estación de CAM, se dio durante el 38 % del tiempo del año de estudio una temperatura igual o superior al promedio del conjunto de estaciones del subtramo TE (10.4 °C), mientras que en la estación de SAN fue un 47 % (Fig. 5). A partir del percentil 50, se identifican en CAM temperaturas de en torno a 1 °C inferiores respecto a SAN; en los meses más cálidos, cuando las temperaturas son iguales o superiores a los 6 °C (Fig. 5). Los valores de  $|IVT|$  representan que en SAN existe mayor variabilidad con respecto a CAM (Tabla 4).

#### *Análisis comparativo del comportamiento térmico*

A partir de los patrones del régimen térmico, en-

tre los subtramos del Cinca y el Ésera estudiados se establecen las siguientes diferencias y equivalencias:

- En el subtramo TC1 (río Cinca) tiene lugar un *efecto térmico diferido* directamente asociado a un esquema de aprovechamiento con derivación y que no tiene réplica en esquemas de aprovechamiento fluvente (río Ésera). El caudal es estable y se reduce exclusivamente al caudal ecológico y, la temperatura del agua está condicionada por el equilibrio con la temperatura ambiente.
- En el subtramo TC2 (río Cinca) se produce el fenómeno de mezcla donde el caudal ecológico (afectado por el “*efecto térmico diferido*”) y el caudal turbinado (amortiguado térmicamente) confluyen y se combinan e, igual que en el subtramo TC1, no tiene réplica en un esquema de aprovechamiento fluvente. El caudal es variable y regulado por hidropuntas y, la temperatura del agua está condicionada por el amortiguamiento térmico durante la derivación por tuberías aisladas.
- Finalmente, tanto en el subtramo TC3 (río Cinca) como en TE (río Ésera), la tempera-



**Figura 6.** Registros de temperatura correspondientes a las campañas de verano (C1.1, naranja, y C1.2, rojo) e invierno (C2, azul) en el río Cinca. Cada observación representa la media de las tres medidas obtenida (margen derecho, centro y margen izquierdo del cauce). *Temperature observations corresponding to the summer (C1.1, orange and C1.2 red) and winter (C2, blue) campaigns in the Cinca River. Each observation represents the mean of the three measurements obtained (right bank, centre and left bank of the channel).*

tura del agua se aproxima a la temperatura de equilibrio bajo el régimen de hidropuntas. No obstante, la variabilidad de temperaturas en el subtramo TE aguas abajo es mayor por efecto de la mayor magnitud de las hidropuntas en relación con el caudal base del río. Además, la propia configuración del valle conlleva un mayor confinamiento y una menor heterogeneidad morfológica en comparación con el Cinca. Esto provoca una menor laminación de los caudales, de modo que con ello se mantiene una alta transmisividad de los efectos térmicos aguas abajo (efecto pistón). La recuperación progresiva de la temperatura (aumento de temperatura en verano) en los subtramos TC3 y TE viene dada por la gestión de aguas turbinadas. En verano, en el caso de los subtramos TC3 y TE las aguas turbinadas tienen menor temperatura, ya que provienen de la presa cuya temperatura está amortiguada térmicamente y gestionada por los regímenes de hidropuntas de las centrales de Laspuña y Campo.

### Variabilidad térmica y efectos ecológicos en el río Cinca

#### *Gradiente térmico longitudinal y temporal*

El gradiente térmico longitudinal en el río Cinca fue estudiado durante dos campañas de muestreo (desde el pie de la presa de Laspuña hasta la estación de aforo de Escalona), discriminando, en el caso de la campaña de verano, entre mañana y tarde (Fig. 6). En el subtramo TC1, en la campaña de verano realizada por la tarde (C1.2) el gradiente térmico máximo fue de 6.3 °C frente a los 3.2 °C medidos durante la mañana (C1.2). En la campaña de invierno (C2), en cambio, el gradiente térmico máximo en el mismo subtramo TC1 fue muy inferior de en torno a 1.1 °C. Teniendo en cuenta que el caudal circulante por el subtramo fue el mismo (caudal ecológico) en ambas campañas de muestreo, las diferencias encontradas entre invierno y verano, como también entre mañana y tarde durante el verano, se explicaran por la distinta entrada de calor a la masa de agua desde la atmósfera según la exposición a la radiación solar. De esta forma, en el subtramo de

estudio el efecto térmico diferido se concentra en el verano y resulta inapreciable en invierno. En el subtramo TC2 sujeto a hidropuntas se aprecia un escenario habitual de *termopeaking* con un acusado gradiente térmico negativo (enfriamiento del agua) en la campaña de verano, de hasta -5.8 °C y un calentamiento en invierno de +2.3 °C, debido a los cambios de caudal como también afirma Meier et al. (2003) en otros casos de estudio similares. En el subtramo TC3 la temperatura del agua tiende a ir aumentando río abajo y, al final de este subtramo (2.7 km aguas abajo del efluente de la central hidroeléctrica), se aprecia una estabilización de la temperatura en verano, lo que significa que el caudal circulante alcanza su temperatura de equilibrio de forma progresiva. Choi & Choi (2018) en un escenario similar afirma que la temperatura de equilibrio se alcanzaba alrededor de 2 km aguas abajo *i.e.* en el mismo orden de magnitud que el encontrado en el río Cinca.

Las aportaciones de los dos tributarios existentes, ríos Yaga y Bellos, no parecen alterar de forma significativa el gradiente térmico longitudinal, al menos en las dos campañas de muestreo realizadas. Las oscilaciones de temperatura en el entorno de su desembocadura podrían haberse visto afectadas por efectos locales en la obtención de los valores de temperatura asociados a posibles características hidráulicas de los puntos muestreados (*i.e.* rápidos, remansos).

Las aguas turbinadas son algo más frías en origen por el efecto de la amortiguación de la variación de la temperatura del agua del fondo del embalse. El agua se transporta aislado mediante tuberías desde la presa de Laspuña y se reingresa al cauce del río aguas abajo por el que circula un caudal ecológico que ha estado en contacto con la temperatura ambiente y expuesto a insolación durante kilómetros. Por la tarde, el salto térmico asociado al reingreso del agua turbinada es mayor respecto a por la mañana porque las aguas embalsadas en origen (presa de Laspuña) no han variado su temperatura mientras que las que fluyen por el cauce, en forma de caudal ecológico, han acumulado más horas de insolación. Estas variaciones térmicas pueden tener efectos en la composición y la dinámica de las comunidades naturales acuáticas de los distintos tramos de ríos considerados, tal y como se puso de manifiesto

en las simulaciones de aumento y descenso de temperatura del agua llevadas a cabo por Webb & Walling (1993) donde demuestran que los impactos térmicos llegan a persistir hasta 5 km aguas abajo de la presa. A partir del estudio de variaciones de temperatura, llegan a identificar sobre que especies de peces y macrobentos tiene mayor efecto la regulación, permitiendo la predicción de los días en que tardarán en emerger los alevines además de su incremento de peso en cada zona. El modelo de calentamiento de corrientes que define Poole & Berman (2001), representa los efectos de un cambio hipotético en la estructura de la corriente donde identifica un aumento de temperatura del 2.5 % por kilómetro de corriente llegando a aproximar una temperatura de equilibrio supuesta de 22.5 °C, similares a los valores medidos en el subtramo TC1 aguas arriba de la central de Laspuña en los meses cálidos.

En la campaña de muestreo invernal (C2) el gradiente longitudinal observado en el subtramo TC1 es de 1.1 °C, un valor muy inferior al del verano, por otro lado, lógico por la menor amplitud térmica de la época invernal a escala diaria. La causa tanto del menor gradiente longitudinal como de la menor variabilidad térmica diaria en invierno es la misma: el mayor caudal y el menor rango térmico. En invierno la situación que se observa en la zona de reingreso del caudal turbinado es la inversa a la estival: las aguas turbinadas generaron un calentamiento del flujo circulante al

reingresar de hasta 2.3 °C. En este caso, el agua circulante (caudal ecológico) aguas abajo de la presa de Laspuña apenas varía su temperatura y la mayor temperatura del agua turbinada aumenta la temperatura del caudal circulante en los subtramos TC2 y TC3. Las aguas circulantes del cauce principal oscilan térmicamente vinculadas a la temperatura ambiente, ya que el flujo térmico neto tiende a la temperatura de equilibrio al estar en contacto directo con la atmósfera, mientras que el agua turbinada por la central se transporta desde la presa por una tubería aislada del contacto directo con el ambiente, de modo que se derivan los efectos del amortiguamiento térmico del agua en profundidad del embalse. El agua turbinada recibe por fricción calor de los propios equipos electromecánicos de la central hidroeléctrica, aunque el calentamiento durante el turbinado no es relevante a la escala de este estudio (Limnos, 1998). De manera global en invierno, el reequilibrio térmico que se produce en el subtramo TC3 del río Cinca comprendido entre la CH Laspuña (LAB) y Escalona (ESC), se traduce en un ligero enfriamiento (-0.22 °C).

#### *Efectos ecológicos potenciales de las alteraciones térmicas identificadas*

La temperatura del agua desempeña un papel clave en cualquier proceso natural, ya que condiciona procesos físicos y químicos y actúa como

**Tabla 5.** Resumen de los máximos gradientes térmicos observados (°C) y su equivalencia en mg O<sub>2</sub>/L correspondientes al 100 % de saturación según la expresión de Mortimer (1981) registrados en el río Cinca. *Summary of the maximum observed thermal gradients (°C) and their equivalence in mg O<sub>2</sub>/L corresponding to 100% saturation according to the expression of Mortimer (1981) recorded in the Cinca River.*

| Época    | Máximos gradientes térmicos observados (°C)                  |       |               |       |               |       |
|----------|--|-------|---------------|-------|---------------|-------|
|          | TC1  |       | TC2           |       | TC3           |       |
|          | Rango  | Var.  | Rango         | Var.  | Rango         | Var.  |
| Verano   | 15.38 – 21.63  | +6.25 | 21.58 – 17.83 | -3.75 | 15.81 – 17.11 | +1.30 |
| Invierno | 4.86 – 5.95  | +1.09 | 5.64 – 7.88   | +2.24 | 7.88 – 7.66   | -0.22 |
| Época    | mg O <sub>2</sub> /L correspondientes al 100 % de saturación |       |               |       |               |       |
|          | TC1  |       | TC2           |       | TC3           |       |
|          | Rango  | Var.  | Rango         | Var.  | Rango         | Var.  |
| Verano   | 9.33 – 8.22  | -1.11 | 8.23 – 8.86   | +0.63 | 9.25 – 9.00   | -0.25 |
| Invierno | 11.95 – 11.62  | -0.33 | 11.72 – 11.08 | -0.64 | 11.08 – 11.14 | +0.06 |

factor de regulación en todas las actividades donde intervienen seres vivos. La temperatura es un parámetro regulador implicado en las solubilidades de gases y, aunque se trata de ríos de aguas limpias, el efecto térmico se traduce en diferencias de oxígeno del orden de 0.25 mg/L por grado de temperatura. En el caso de macroinvertebrados bentónicos, hay estudios (Carolli et al., 2012) que demuestran que la inestabilidad de temperatura afecta a las especies polivoltinas, ya que perturban los ciclos de emergencias y desarrollo; en el caso de la trucha, especie dominante en ambos ríos, puede incluso condicionar su embriogénesis y desarrollo (i. e. Crisp, 1992). Cabe destacar que la reducción de variabilidad del flujo natural puede conducir a cambios ecológicos indeseables al crear un hábitat adecuado para especies invasoras no nativas (Gubiani et al., 2018). La Tabla 5 recopila los máximos gradientes térmicos observados en el río Cinca y su traducción en términos de disponibilidad de oxígeno disuelto en el agua según la expresión de Mortimer (1981). No se ha tenido en cuenta el efecto de la variación altitudinal entre los puntos de muestreo, dado que se considera poco relevante en el presente caso de estudio (se ha adoptado una altitud media de 584 m s. n. m.). No obstante, con el único fin de mostrar su afectación potencial, se ha calculado, en términos de masa, que un volumen de agua equivalente al existente en el subtramo TC1 (5 km de longitud, 12 m de anchura media y 35 cm de profundidad media) disminuiría su contenido en oxígeno en 23.3 kg como consecuencia de su sobrecalentamiento estival (en el caso de que este fuera por completo debido a la detracción de caudales). Teniendo en cuenta que se necesitan 0.572 g de  $O_2$  para oxidar 1 g de materia orgánica (Margalef, 1983), se perdería la capacidad para oxidar unos 40.7 kg de materia orgánica, lo que representa alrededor del 1 % de la producción secundaria anual de un río que, de acuerdo con Margalef (1983), se sitúa en torno a 1-10  $gCm^{-2}año^{-1}$ ; y adoptando un valor medio y aplicándolo al subtramo de río considerado supondría unos 3.75 kg/año de materia orgánica fresca. En términos de balance de oxígeno, según Margalef (1983) en arroyos pirenaicos a 780 m s. n. m. la producción y el consumo de oxígeno disuelto por parte de las comunidades reófilas del fitobentos algal oscilan, respectiva-

mente, entre 0.37-3.56  $gO_2m^{-2}día^{-1}$  y 3.63-14.71  $gO_2m^{-2}día^{-1}$ . Adoptando de nuevo valores medios, el balance de oxígeno neto producción-respiración se situaría en torno a -7.2  $gO_2m^{-2}día^{-1}$ . Los 23.3 kg de pérdida de oxígeno disuelto como consecuencia del efecto térmico diferido (sobrecalentamiento estival) para unos 6000  $m^2$  de superficie de cauce y 100 días de verano, se traducen en 0.026  $gO_2m^{-2}día^{-1}$ , es decir, un 0.4 % del balance de oxígeno. Este valor, aunque ciertamente bajo, no es ecológicamente despreciable por dos razones: i) no es compensable por aireación, dado que viene limitado por la mayor temperatura del agua, y ii) tiene lugar en la época del año (verano) con mayor tasa de respiración en el ecosistema fluvial. Cabe apreciar la casual compensación verano-invierno que se establece, en términos de variación, en el contenido de oxígeno disuelto a saturación, con el ingreso de los caudales turbinados (*thermo-peak*). En el presente caso de estudio, el efecto térmico diferido tendría mayores consecuencias sobre la dinámica del oxígeno disuelto que el *thermo-peak*.

Otra consecuencia de la alteración del régimen térmico es la distorsión de los ciclos biológicos de las especies acuáticas, aspecto este bastante estudiado (Jowett, 2003; Gibbins et al., 2007). Cada evento de termopunta causa una alteración en la temperatura a escala horaria, fenómeno que puede causar una disrupción de los patrones de deriva habituales de los macroinvertebrados (i. e. Bruno et al., 2010; Timusk et al., 2016). A nivel de macroinvertebrados bentónicos Palau-Ibars et al. (2019) en un tramo alto del río Noguera Pallaresa (Pirineos Centrales [Lleida]) sometido a *thermo-peak* encontraron desfases temporales apreciables en varios taxones (*Heptageniidae*, *Simuliidae*, *Athericidae*, etc.) con respecto a la dinámica de estos grupos en un tramo alto del control sin alteración del régimen térmico natural.

Sobre las poblaciones de peces, los cambios de temperatura del agua alteran su comportamiento y su fisiología. Crisp (1989) estableció, para el caso de la trucha común (*Salmo trutta*), la relación existente entre la temperatura del agua y la duración de las distintas fases de su desarrollo embrionario. Los aumentos de la temperatura del agua que se dan en el periodo más frío del año, comprendido entre noviembre y febrero, coinci-

dente con el proceso de freza y desarrollo inicial de la trucha, pueden suponer una reducción significativa en el número de días necesarios para la eclosión. Así, en el caso de los subtramos TC1, TC2 y TC3 con variaciones artificiales de la temperatura del agua en invierno de +1.09 °C, +2.24 °C y -0.22 °C respectivamente, el periodo de eclosión de los huevos de trucha del año, suponiendo la existencia de zonas de freza adecuadas y la ausencia por igual en los tres subtramos de río considerados de otros factores condicionantes distintos a la temperatura del agua, podría experimentar un adelanto de unos 14 días en el caso del subtramo TC1 y de unos 21 días en el subtramo TC2 y un retraso de 2 días en el subtramo TC3. La trascendencia de estos cambios está ligada, entre otros factores, al régimen hidrológico local en la medida en que una eclosión temprana (o tardía) si cae dentro de un periodo con mayor probabilidad de crecidas, puede dar lugar a una pérdida importante del reclutamiento anual de la trucha.

## CONCLUSIONES

En este estudio se analizan los efectos dos esquemas diferentes de aprovechamiento hidroeléctrico sobre la temperatura del agua del río. El análisis de la variabilidad térmica espacial y temporal permite concluir que la repercusión sobre el régimen de temperaturas del agua es relevante.

En este contexto las principales conclusiones son:

1. El tramo regulado mediante un esquema de aprovechamiento con derivación (río Cinca) muestra un efecto térmico doble: el cauce sujeto al caudal ecológico está más ligado a los cambios térmicos ambientales (*efecto térmico diferido*) mientras que el cauce donde se produce el reingreso del agua turbinada (*thermo-peaking*) presenta una amplitud térmica muy inferior, con temperaturas máximas de hasta 7 °C por debajo de las registradas en el cauce con caudal ecológico, para la misma época. En el caso del tramo regulado mediante un esquema de aprovechamiento hidroeléctrico a pie de presa (río Ésera) solo se distingue, a efectos térmicos, un único ambiente que

sigue el patrón esperable de calentamiento progresivo río abajo, que por término medio representa un incremento de 0.056 °C/km a lo largo del año.

2. En el caso del Cinca, los efectos de la alteración del régimen térmico se han traducido, de forma orientativa, en términos de variación en la disponibilidad de oxígeno disuelto, ya que se observa una pérdida de unos 23.3 kg O<sub>2</sub> en el conjunto del tramo considerado, lo que representaría una reducción de la capacidad de oxidación de materia orgánica del orden de un 1 % de la producción secundaria anual del río.

El conocimiento de la influencia de los diferentes tipos de esquemas hidroeléctricos sobre los regímenes térmicos de los ríos donde se encuentran, especialmente tramos altos de montaña, es relevante para interpretar con mayor precisión el alcance de los efectos ecológicos de la producción de energía hidroeléctrica y contribuir al diseño y la implementación de medidas ambientales cada vez más eficaces. Por ejemplo, los ciclos biológicos de especies presentes en el Cinca se pueden ver distorsionados en función de los escenarios térmicos presentados. En el caso de los invertebrados bentónicos son esperables distorsiones más o menos relevantes en el calendario de recambio generacional de las especies polivoltinas; mientras que en el caso de los peces (*i.e.* trucha común, *Salmo trutta*) la eclosión de las puestas podría experimentar adelantos de hasta 21 días como consecuencia de las variaciones de temperatura descritas.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está realizado en el marco de los proyectos de investigación del grupo RIUS (Grupo de Investigación en Dinámica Fluvial consolidado de la Generalitat de Catalunya 2021 SGR 01114, Universitat de Lleida, [www.fluvialdynamics.com](http://www.fluvialdynamics.com)) llevados a cabo en los ríos Cinca y Ésera: MorphHab (PID2019-104979RB-I00/AEI/10.13039/501100011033) y MorphPeak (CGL2016-78874-R/AEI/10.13039/501100011033). Los proyectos han sido financiados por la Agencia Estatal de

Investigación (AEI) del Ministerio de Economía y Competitividad y el Ministerio de Ciencia e Innovación y por el Esquema de Fondos de Desarrollo Regional Europeo. Estrella Carrero-Carralero realizó este trabajo gracias a un contrato de investigadores en formación de la Universitat de Lleida. Damián Vericat está contratado a través del programa Serra Húnter de la Generalitat de Catalunya. Los autores quieren agradecer a los miembros del equipo RIUS su ayuda y colaboración durante el trabajo de campo, en especial a Fanny Ville y Antoni Palau Nadal. Agradecer la disponibilidad y la obtención de datos a la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), incluido el Sistema Automático de Información Hidrológica de la cuenca del río Ebro (SAIH) y del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Además, gracias a ACCIONA, S. A., por permitir y facilitar nuestro trabajo de campo en torno a las centrales hidroeléctricas de Laspuña y Campo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ashraf, F. B., Haghghi, A. T., Riml, J., Alfredsen, K., Koskela, J. J., Kløve, B., & Marttila, H. (2018). Changes in short term river flow regulation and hydropeaking in Nordic rivers. *Scientific reports*, 8(1), 17232. DOI: 10.1038/s41598-018-35406-3
- Auer, S., Zeiringer, B., Führer, S., Tonolla, D., & Schmutz, S. (2017). Effects of river bank heterogeneity and time of day on drift and stranding of juvenile European grayling (*Thymallus thymallus* L.) caused by hydropeaking. *Science of the Total Environment*, 575, 1515-1521. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.10.029
- Batalla, R. J., Gomez, C. M., & Kondolf, G. M. (2004). Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain). *Journal of Hydrology*, 290(1-2), 117-136. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2003.12.002
- Batalla, R. J., Gibbins, C. N., Alcázar, J., Brasington, J., Buendia, C., Garcia, C., ... & Vericat, D. (2021). Hydropeaked rivers need attention. *Environmental Research Letters*, 16(2), 021001. DOI: 10.1088/1748-9326/abce26
- Berga, L. (2016). The role of hydropower in climate change mitigation and adaptation: a review. *Engineering*, 2(3), 313-318. DOI: 10.1016/J.ENG.2016.03.004
- Brizga, S. O., Arthington, A. H., Choy, S., Craigie, N. M., Mackay, S., Poplawski, W., & Werren, G. (2001). Pioneer valley water resource plan: Proposed environmental flow assessment framework. *Water Resource (Pioneer Valley) Plan 2002*. Brisbane, Australia, Department of Natural Resources and Mines, 2.
- Bruno, M. C., Maiolini, B., Carolli, M., & Silveri, L. (2010). Short time-scale impacts of hydropeaking on benthic invertebrates in an Alpine stream (Trentino, Italy). *Limnologica*, 40(4), 281-290. DOI: 10.1016/j.limno.2009.11.012
- Bruno, M. C., Siviglia, A., Carolli, M., & Maiolini, B. (2013). Multiple drift responses of benthic invertebrates to interacting hydropeaking and thermopeaking waves. *Ecohydrology*, 6(4), 511-522. DOI: 10.1002/eco.1275
- Buendía, C., Sabater, S., Palau-Ibars, A., Batalla, R. J., & Marcé, R. (2015). Using equilibrium temperature to assess thermal disturbances in rivers. *Hydrological Processes*, 29(19), 4350-4360. DOI: 10.1002/hyp.10489
- Bunn, S. E., & Arthington, A. H. (2002). Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management*, 30, 492-507. DOI: 10.1007/s00267-002-2737-0
- Caissie, D., Satish, M. G., & El-Jabi, N. (2005). Predicting river water temperatures using the equilibrium temperature concept with application on Miramichi River catchments (New Brunswick, Canada). *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(11), 2137-2159. DOI: 10.1002/hyp.5684
- Carolli, M., Maiolini, B., Bruno, M. C., Silveri, L., & Siviglia, A. (2008). Thermopeaking in an hydropower impacted Alpine catchment. *In 4th ECRR conference on river restoration*, Venice S. Servolo Island, Italy (pp. 789-796). Handle: <http://hdl.handle.net/10449/16194>
- Carolli, M., Bruno, M. C., Siviglia, A., & Maiolini, B. (2012). Responses of benthic invertebrates to abrupt changes of temperature in flume simulations. *River Research and Applications*, 28(6), 678-691. DOI: 10.1002/rra.1520
- Casas-Mulet, R., Saltveit, S. J., & Alfredsen, K. (2015). The survival of Atlantic salmon (*Sal-*

- mo salar*) eggs during dewatering in a river subjected to hydropeaking. *River Research and Applications*, 31(4), 433-446. DOI: 10.1002/rra.2827
- Choi, B., & Choi, S. U. (2018). Impacts of hydropeaking and thermopeaking on the downstream habitat in the Dal River, Korea. *Ecological Informatics*, 43, 1-11. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2017.10.016
- Costa, M. J., Boavida, I., Almeida, V., Cooke, S. J., & Pinheiro, A. N. (2018). Do artificial velocity refuges mitigate the physiological and behavioural consequences of hydropeaking on a freshwater Iberian cyprinid? *Ecohydrology*, 11(7). DOI: 10.1002/eco.1983
- Crisp, D. T. (1989). Some impacts of human activities on trout, *Salmo trutta*, populations. *Freshwater Biology*, 21(1), 21-33. DOI: 10.1111/j.1365-2427.1989.tb01345.x
- Crisp, D. T. (1992). Measurement of Stream Water Temperature and Biological Applications to Salmonid Fishes, Grayling and Dace: (including Ready Reckoners for Calculating Median Eyeing, Hatching and Swim-up of Embryos, and Growth Rates, Maximum, Optimum and Maintenance Rations for Brown Trout at Various Temperatures). *Freshwater Biological Association*.
- Crisp, D. T. (1996). Environmental requirements of common riverine European salmonid fish species in fresh water with particular reference to physical and chemical aspects. *Hydrobiologia*, 323(3), 201-221. DOI: 10.1007/BF00007847
- De Jalón, D. G., Mayo, M., & Molles, M. C. (1996). Characterization of Spanish Pyrenean stream habitat: relationships between fish communities and their habitat. *Regulated Rivers: Research & Management*, 12(2-3), 305-316. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1646(199603)12:2/3<305::AID-RRR397>3.0.CO;2-B
- Edinger, J. E., Duttweiler, D. W., & Geyer, J. C. (1968). The response of water temperatures to meteorological conditions. *Water Resources Research*, 4(5), 1137-1143. DOI: 10.1029/WR004i005p01137
- Elçi, Ş. (2008). Effects of thermal stratification and mixing on reservoir water quality. *Limnology*, 9, 135-142. DOI: 10.1007/s10201-008-0240-x
- Fantin-Cruz, I., Pedrollo, O., Girard, P., Zeilhofer, P., & Hamilton, S. K. (2015). Effects of a diversion hydropower facility on the hydrological regime of the Correntes River, a tributary to the Pantanal floodplain, Brazil. *Journal of Hydrology*, 531, 810-820. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.10.045
- Fette, M., Weber, C., Peter, A., & Wehrli, B. (2007). Hydropower production and river rehabilitation: A case study on an alpine river. *Environmental Modelling & Assessment*, 12, 257-267. DOI: 10.1007/s10666-006-9061-7
- Firoozi, F., Roozbahani, A., & Massah Bavani, A. R. (2020). Developing a framework for assessment of climate change impact on thermal stratification of dam reservoirs. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17, 2295-2310. DOI: 10.1007/s13762-019-02544-8
- Gibbins, C., Vericat, D., & Batalla, R. J. (2007). When is stream invertebrate drift catastrophic? The role of hydraulics and sediment transport in initiating drift during flood events. *Freshwater Biology*, 52(12), 2369-2384. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2007.01858.x
- Gubiani, E. A., Ruaro, R., Ribeiro, V. R., Eichelberger, A. C. A., Bogoni, R. F., Lira, A. D., ... & da Graca, W. J. (2018). Non-native fish species in Neotropical freshwaters: how did they arrive, and where did they come from? *Hydrobiologia*, 817, 57-69. DOI: 10.1007/s10750-018-3617-9
- Han, B. P., Armengol, J., Garcia, J. C., Comerma, M., Roura, M., Dolz, J., & Straskraba, M. (2000). The thermal structure of Sau Reservoir (NE: Spain): a simulation approach. *Ecological Modelling*, 125(2-3), 109-122. DOI: 10.1016/S0304-3800(99)00176-3
- Harby, A., Forseth, T., Ugedal, O., Bakken, T. H., & Sauterleute, J. F. (2016). A Method to assess impacts from hydropeaking. In *11th ISE*, Melbourne, Australia.
- Hauer, C., Siviglia, A., & Zolezzi, G. (2017). Hydropeaking in regulated rivers: from process understanding to design of mitigation measures. *Science of the Total Environment*, 579, 22-26. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.028
- Hidroeléctricas (2006). *Manuales de Energía Re-*

- novables*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), Madrid, España.
- Hayes, D. S., Moreira, M., Boavida, I., Haslauer, M., Unfer, G., Zeiringer, B., & Schmutz, S. (2019). Life stage-specific hydropeaking flow rules. *Sustainability*, 11(6), 1547. DOI: 10.3390/su11061547
- Jones, N.E. (2014). The dual nature of hydropeaking rivers: Is ecopeaking possible? *River Research and Applications*, 2014, 30, 521–526. DOI: 10.1002/rra.2653
- Jowett, I. G. (2003). Hydraulic constraints on habitat suitability for benthic invertebrates in gravel-bed rivers. *River Research and Applications*, 19(5-6), 495-507. DOI: 10.1002/rra.734
- Kelly, B., Smokorowski, K. E., & Power, M. (2017). Impact of river regulation and hydropeaking on the growth, condition and field metabolism of Brook Trout (*Salvelinus fontinalis*). *Ecology of Freshwater Fish*, 26(4), 666-675. DOI: 10.1111/eff.12310
- Kittrell, F. W. (1965). Thermal stratification in reservoirs. In *Symposium on Stream-flow Regulation for Quality Control* (pp. 57-67). Robert A. Taft Sanitary Engineering Center. Environmental Health Series, Water Supply and Pollution Control.
- Kuhn, J., Casas-Mulet, R., Pander, J., & Geist, J. (2021). Assessing stream thermal heterogeneity and cold-water patches from UAV-based imagery: A matter of classification methods and metrics. *Remote Sensing*, 13(7), 1379. DOI: 10.3390/rs13071379
- Langan, S. J., Johnston, L., Donaghy, M. J., Youngson, A. F., Hay, D. W., & Soulsby, C. (2001). Variation in river water temperatures in an upland stream over a 30-year period. *Science of the Total Environment*, 265(1-3), 195-207. DOI: 10.1016/S0048-9697(00)00659-8
- LeRoy, N., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., & Stromberg, J. C. (1997). The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, 47(11), 769-784. DOI: 10.2307/1313099
- Limnos (1998). Estudio de la calidad ecológica integral del río Ebro. Confederación Hidrográfica del Ebro, Zaragoza.
- Margalef, R. (1983) *Limnología*. Universidad de Barcelona, Barcelona (España). DOI: 10.4319/lo.1984.29.6.1349b
- Martínez, C., & Fernández, J. A. (2011). Obtención de escenarios de régimen ambiental de caudales (RAC) a partir del régimen natural: Una nueva extensión del software IAHRIS. *En I Congreso Ibérico de Restauración Fluvial RESTAURARÍOS*, León.
- Meier, W., Bonjour, C., Wüest, A., & Reichert, P. (2003). Modelling the effect of water diversion on the temperature of mountain streams. *Journal of Environmental Engineering*, 129(8), 755-764. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2003)129:8(755)
- Mejía, F. H., Torgersen, C. E., Berntsen, E. K., Maroney, J. R., Connor, J. M., Fullerton, A. H., ... & Lorang, M. S. (2020). Longitudinal, lateral, vertical, and temporal thermal heterogeneity in a large impounded river: Implications for cold-water refuges. *Remote Sensing*, 12(9), 1386. DOI: 10.3390/rs12091386
- Moog, O. (1993). Quantification of daily peak hydropower effects on aquatic fauna and management to minimize environmental impacts. *Regulated Rivers: Research & Management*, 8(1-2), 5-14. DOI: 10.1002/rrr.3450080105
- Moreira, M., Hayes, D. S., Boavida, I., Schletterer, M., Schmutz, S., & Pinheiro, A. (2019). Ecologically-based criteria for hydropeaking mitigation: A review. *Science of the Total Environment*, 657, 1508-1522. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.107
- Mortimer, C. H. (1981). The oxygen content of air-saturated fresh waters over ranges of temperature and atmospheric pressure of limnological interest: With 6 figures and 1 table in the text and on 1 folder, and 4 appendices. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Mitteilungen*, 22(1), 1-23. DOI: 10.1080/05384680.1981.11904000
- Palau-Nadal, A., Palau-Ibars, A., Alcázar, J., Béjar, M., (2018). Preliminary Analysis of Effects of Hydropeaking on Water Temperature and Macroinvertebrates Population in a Mountain River in the Pyrenees (Ne, Spain). *IAHR, Proceedings of the 12th International Symposium on Ecohydraulics* (Tokyo).
- Palau-Ibars, A., Rocaspana, R., Aparicio, E.,

- Batalla., R.J., Vericat, D., Pedrocchi, V., Palau-Nadal, A., Marín, N., García-Escudero, A. (2019). Análisis de los efectos de las hidropuntas en ríos regulados: El caso de la C.H. Esterri-Unarre (ENDESA) en el río Noguera Pallaresa (Lleida). Endesa, ISBN: 8409192845, 9788409192847 (pp.109).
- Prats, J., Val, R., Armengol, J., & Dolz, J. (2010). Temporal variability in the thermal regime of the lower Ebro River (Spain) and alteration due to anthropogenic factors. *Journal of Hydrology*, 387(1-2), 105-118. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.04.002
- Poff, N. L., & Allan, J. D. (1995). Functional organization of stream fish assemblages in relation to hydrological variability. *Ecology*, 76(2), 606-627. DOI: 10.2307/1941217
- Poole, G. C., & Berman, C. H. (2001). An ecological perspective on in-stream temperature: natural heat dynamics and mechanisms of human-caused thermal degradation. *Environmental Management*, 27, 787-802. DOI: 10.1007/s002670010188
- Prats, J., Val, R., Dolz, J., & Armengol, J. (2012). Water temperature modelling in the Lower Ebro River (Spain): Heat fluxes, equilibrium temperature, and magnitude of alteration caused by reservoirs and thermal effluent. *Water Resources Research*, 48(5). DOI: 10.1029/2011WR010379
- Pulg, U., Vollset, K. W., Velle, G., & Stranzl, S. (2016). First observations of saturopeaking: Characteristics and implications. *Science of the Total Environment*, 573, 1615-1621. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.143
- Raddum, G. G., Fjellheim, A., & Velle, G. (2008). Increased growth and distribution of *Ephemera aurivillii* (Ephemeroptera) after hydro-power regulation of the Aurland catchment in Western Norway. *River Research and Applications*, 24(5), 688-697. DOI: 10.1002/rra.1142
- Rheinheimer, D. E., & Viers, J. H. (2015). Combined effects of reservoir operations and climate warming on the flow regime of hydropower bypass reaches of California's Sierra Nevada. *River Research and Applications*, 31(3), 269-279. DOI: 10.1002/rra.2749
- REN21. (2022). *Renewables 2022 Global Status Report*. Paris: REN21 Secretariat. ISBN: 978-3-948393-04-5 (pp. 119).
- Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Powell, J., & Braun, D. P. (1996). A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, 10(4), 1163-1174. DOI: 10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x
- Richter, B., Baumgartner, J., Wigington, R., & Braun, D. (1997). How much water does a river need? *Freshwater biology*, 37(1), 231-249. DOI: 10.1046/j.1365-2427.1997.00153.x
- Richter, B. D., & Thomas, G. A. (2007). Restoring environmental flows by modifying dam operations. *Ecology and Society*, 12(1). DOI: <https://www.jstor.org/stable/26267852>
- Salmaso, F., Servanzi, L., Crosa, G., Quadroni, S., & Espa, P. (2021). Assessing the impacts of hydropeaking on river benthic macroinvertebrates: A state-of-the-art methodological overview. *Environments*, 8(7), 67. DOI: 10.3390/environments8070067
- Sauterleute, J. F., & Charmasson, J. (2014). A computational tool for the characterisation of rapid fluctuations in flow and stage in rivers caused by hydropeaking. *Environmental Modelling & Software*, 55, 266-278. DOI: 10.1016/j.envsoft.2014.02.004
- Schleiss, A. (2020). The importance of hydro-power development for the energy transition in Europe. In *11th ICOLD European Club Symposium*. Chania, Crete (pp. 2-4).
- Stanford, J. A., & Ward, J. V. (2001). Revisiting the serial discontinuity concept. *Regulated Rivers: Research & Management: An International Journal Devoted to River Research and Management*, 17(4-5), 303-310. DOI: 10.1002/rrr.659
- Timusk, E. R., Smokorowski, K. E., & Jones, N. E. (2016). An experimental test of sub-hourly changes in macroinvertebrate drift density associated with hydropeaking in a regulated river. *Journal of Freshwater Ecology*, 31(4), 555-570. DOI: 10.1080/02705060.2016.1193064
- Tena, A., Ville, F., Reñe, A., Yarnell, S. M., Batalla, R. J., & Vericat, D. (2023). Hydrological characterization of hydropeaks in mountain rivers (examples from Southern Pyrenees). *River Research and Applications*, 39(3), 292-312. DOI: 10.1002/rra.4058

- Webb, B. W. (1996). Trends in stream and river temperature. *Hydrological Processes*, 10(2), 205-226. DOI: 10.1111/j.1365-2427.1993.tb00752.x
- Webb, B. W., & Walling, D. E. (1993). Temporal variability in the impact of river regulation on thermal regime and some biological implications. *Freshwater Biology*, 29(1), 167-182.
- Webb, L. B., Whetton, P. H., & Barlow, E. W. R. (2008). Climate change and winegrape quality in Australia. *Climate Research*, 36(2), 99-111. DOI: 10.3354/cr00740
- Zarfl, C., Lumsdon, A. E., Berlekamp, J., Tydecks, L., & Tockner, K. (2015). A global boom in hydropower dam construction. *Aquatic Sciences*, 77, 161-170. DOI: 10.1007/s00027-014-0377-0
- Zolezzi, G., Siviglia, A., Toffolon, M., & Maiolini, B. (2011). Thermopeaking in Alpine streams: event characterization and time scales. *Ecohydrology*, 4(4), 5. DOI: 10.1002/eco.132