

Influencia de la implementación de una central hidroeléctrica reversible en la hidrodinámica y el comportamiento térmico del embalse de Matalavilla (Alto Sil, León, España)

Anaïs Ramos-Fuertes^{a1}, Antoni Palau^b y Josep Dolz^{a2}

^a Instituto Flumen, Universitat Politècnica de Catalunya – Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Campus Nord ed. B0, Jordi Girona 1-3, Barcelona. E-mail: ^{a1}anaïs.ramos@upc.edu, ^{a2}j.dolz@upc.edu. ^b Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària, Universitat de Lleida. E-mail: apalau@macs.udl.cat.

Línea temática A | Dinámica fluvial de embalses, estuarios y humedales

RESUMEN

El presente trabajo analiza el actual comportamiento térmico e hidrodinámico del embalse de Matalavilla, localizado en el río Valseco (afluente del Sil, León, España), y alguno de los posibles efectos de un proyecto de puesta en funcionamiento de una futura central reversible. Se ha dispuesto de una red *ad hoc* de medida de variables hidrometeorológicas que ha completado la información hídrica disponible y los datos adquiridos por una plataforma multiparamétrica instalada en el embalse con el fin de monitorizar la calidad físico-química del agua en general y la organización térmica de la columna de agua, en particular. Al objeto de estudiar en detalle la hidrodinámica actual del embalse del Matalavilla y bajo la explotación del aprovechamiento reversible proyectado, se ha utilizado el modelo numérico bidimensional CE-QUAL-W2, que permite simular la hidrodinámica de embalses en las dimensiones longitudinal y vertical. Los posibles efectos de la implementación de una futura central de bombeo en la dinámica del embalse de Matalavilla se han evaluado mediante la simulación de la influencia de la masa de agua adicional que constituye el depósito superior bajo el régimen de operación previsto. Se analizan los cambios estimados por el modelo en variables y procesos descriptivos del comportamiento térmico e hidrodinámico de Matalavilla como son la organización térmica del agua, el tiempo de residencia, la duración e intensidad de la estratificación térmica, el balance térmico del embalse y la estabilidad térmica de la columna de agua.

Palabras clave | Régimen térmico de embalses; Modelización numérica; central hidroeléctrica reversible; CE-QUAL-W2.

INTRODUCCIÓN

Las centrales hidroeléctricas de bombeo o reversibles contribuyen a incrementar la capacidad de regulación del sistema eléctrico y garantizar el balance instantáneo producción-consumo ante la penetración creciente de generación no gestionable como la eólica y la fotovoltaica (Wilhelmi Ayza, 2013). Su esquema básico de funcionamiento consiste en un sistema de dos embalses, situados a diferente altitud, e interconectados mediante uno o más grupos bomba-turbina: el agua contenida en el embalse inferior es bombeada durante las horas de menor demanda eléctrica a otro depósito situado a cota más alta, con el fin de turbinarla posteriormente para generar electricidad en las horas de mayor consumo eléctrico. Actualmente, este tipo de centrales constituyen en torno al 1% de la producción eléctrica europea y española (IDAE, 2011; Gimeno-Gutiérrez y Lacal-Aránzategui, 2013). En España, el Plan de Energías Renovables 2011-2020 contempla un incremento considerable de la potencia instalada de bombeo, pasando de 5347 MW en 2010 a 8811 MW en 2020 (IDAE, 2011).

La limnología ocupa un lugar de creciente importancia en la gestión de embalses (Prats Rodríguez *et al.*, 2014). En el caso de la implementación de centrales de bombeo puro, en las que no existen aportaciones naturales al embalse superior, los efectos limnológicos previsibles se suelen concretar en determinar la influencia que pueda ejercer su operación en el embalse inferior, por lo general ya existente. La base de estos efectos limnológicos es en buena medida de tipo hidrodinámico y se fundamenta en los posibles cambios sobre el ciclo térmico del embalse, con particular atención en los procesos de estratificación

térmica y mezcla de la columna de agua. Todo ello, junto con los efectos sobre el tiempo de residencia del agua, puede condicionar de forma significativa la organización física, química y biológica del embalse.

El presente estudio tiene como objetivo el análisis del régimen hidrodinámico y térmico del embalse de Matalavilla y su posible alteración debido a la puesta en funcionamiento de un proyecto de futuro aprovechamiento hidroeléctrico reversible. Para ello se dispone de información de campo hidrometeorológica y de perfiles verticales de temperatura del agua tomados por una plataforma multiparamétrica en el embalse. La comparación de los escenarios de ausencia y presencia de la central proyectada se realiza mediante simulaciones numéricas del modelo CE-QUAL-W2 implantado gracias a la disponibilidad de información de campo (Ramos-Fuertes *et al.*, 2017).

MATERIAL Y MÉTODOS

Zona de estudio

El embalse de Matalavilla (Figura 1) se encuentra situado en el término municipal de Páramo del Sil (León), sobre el cauce del río Valseco, perteneciente a la cuenca del Alto Sil. Tiene una capacidad máxima de 65 hm³, una cota máxima de explotación 960 msnm y la mínima de 910 msnm. A embalse lleno, la superficie de la lámina de agua es de 188 ha. El embalse tiene aproximadamente 5 km de longitud, orientación Este-Oeste y está enmarcado en un entorno de fuertes desniveles, con cumbres cercanas que sobrepasan los 2000 m de altitud.

El clima de la zona es atlántico con influencia mediterránea. Las precipitaciones anuales superan los 1000 mm, y alcanzan valores de 2000 mm a alturas superiores a los 1600 msnm. Matalavilla recibe tres diferentes aportaciones: la del río Valseco en el que se encuentra (superficie de cuenca aguas arriba 50 km²), un trasvase desde el río Salentinos (superficie de cuenca aguas arriba 27 km², cota de desagüe 957.6 msnm) y otro trasvase desde el embalse de Las Rozas (capacidad 28 hm³, cota de desagüe 921.2 msnm), en el río Sil. De las tres aportaciones, destaca por su importancia el trasvase de Las Rozas, que supone un 88% del caudal anual entrante al embalse. El desagüe de este trasvase se localiza en una posición media del embalse, tanto longitudinal como verticalmente. Los caudales desaguados por Matalavilla son trasvasados a través de una galería forzada hacia la central hidroeléctrica de Las Ondinas, que los incorpora de nuevo al Sil. Esta captación se realiza en las cercanías de la presa y próxima al fondo del embalse (cota de captación 904.2 msnm).

El proyecto de futuro aprovechamiento hidroeléctrico reversible tendría una potencia total instalada de 464 MW y contemplaría la construcción de un depósito superior con una superficie libre de 30.5 ha cuando se encuentre lleno (cota 1608.5 msnm). Para la operación de la central está previsto disponer de un volumen de almacenamiento de 2.7 hm³, correspondiente a 10 h de turbinado a caudal máximo (75 m³/s). La nueva central conectaría con la margen izquierda del embalse de Matalavilla a la cota 898 msnm (sección de contacto 120 m²).

Medidas de campo

Con el objetivo de analizar el actual comportamiento térmico e hidrodinámico del embalse y alimentar el modelo numérico CE-QUAL-W2, se ha dispuesto de una red *ad hoc* de medida de variables hidrometeorológicas que consta de una estación meteorológica, una instalación de medida de flujos de radiación sobre la superficie del agua y tres puntos de medida de la temperatura del agua de entrada del embalse. Esta instrumentación ha completado otra información disponible referida a los caudales de entrada y de salida, los volúmenes embalsados y los datos adquiridos por una plataforma multiparamétrica instalada en el embalse con el fin de monitorizar la calidad físico-química del agua en general y la organización térmica de la columna de agua, en particular (Figura 1). Los detalles de la instrumentación y del control de calidad de los datos se describen en Ramos-Fuertes *et al.* (2017).

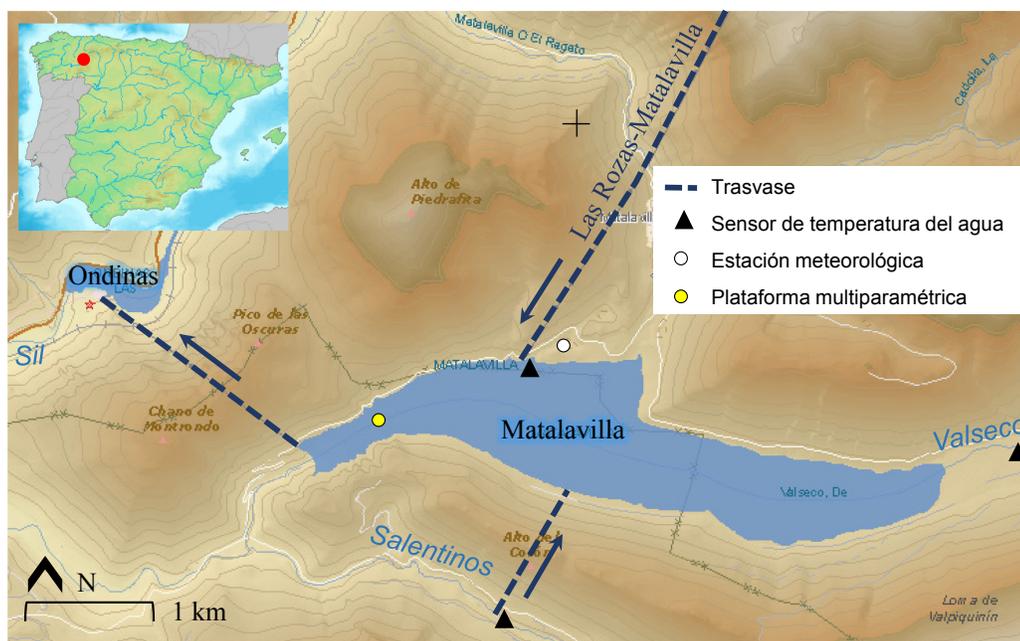


Figura 1 | Localización del embalse de Matalavilla, trasvases que lo afectan en la actualidad e instrumentación de medida.

Modelo numérico

El modelo numérico CE-QUAL-W2 v3.72 (Cole y Wells, 2015) simula bidimensionalmente el comportamiento hidrodinámico del embalse a partir de series de datos temporales de distintas variables: meteorológicas, hidrológicas, hidráulicas y térmicas. Los resultados obtenidos se refieren a la variación temporal y espacial (a lo largo de los ejes longitudinal y vertical del embalse) de temperatura y tiempo de residencia del agua en el embalse.

Gracias a la disponibilidad de información de campo, el modelo ha sido calibrado y validado, representando de manera satisfactoria la organización térmica monitorizada. Durante los periodos de calibración y validación del mismo, los errores medio, absoluto medio y la raíz del error cuadrático medio en la estimación diaria de temperaturas del agua a intervalos de profundidad de 1 m fueron inferiores a 0.05, 0.90 y 1.10 °C, respectivamente, según se describe en Ramos-Fuertes *et al.* (2017).

Impacto de la central reversible

La evaluación de la influencia que ejercería la implementación de un aprovechamiento hidroeléctrico reversible sobre el comportamiento actual del embalse de Matalavilla se realiza mediante la comparación de los escenarios de simulación del modelo numérico en el periodo abril-noviembre de 2015 en las condiciones de presencia y ausencia del mismo. En ambos escenarios se comparan perfiles verticales de temperatura del agua, los tiempos de residencia del agua en el embalse, la temperatura media volumétrica de la masa de agua (media del perfil vertical de temperatura del agua ponderada por el volumen asignado a cada medida), la estabilidad térmica de Schmidt (Schmidt, 1928; Idso, 1973) y el calor acumulado en el embalse.

El calor acumulado en el embalse (H , en MJ) se define con ayuda de la curva hipsométrica cota-área como:

$$H = \int_0^{z_{max}} t_z C A_z \partial_z \quad (1)$$

donde z_{max} (m) es la profundidad máxima, t_z (K) la temperatura del agua a profundidad z , C es la capacidad calorífica volumétrica del agua ($4.18 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$), A_z (m^2) el área de la cubeta a la profundidad z y ∂_z (m) el intervalo de profundidad.

Finalmente, la estabilidad térmica de Schmidt (S_t , en J/m^2) se define como el trabajo necesario para realizar la mezcla de la columna de agua:

$$S_t = \frac{g}{A_s} \int_0^{z_{max}} (z - z_v) \rho_z A_z \partial_z \quad (2)$$

donde g es la aceleración de la gravedad, A_s el área superficial, ρ_z la densidad del agua a profundidad z y z_v es la profundidad del centro de masa del embalse, definida como $z_v = \int_0^{z_{max}} z A_z \partial_z / \int_0^{z_{max}} A_z \partial_z$ (Read *et al.*, 2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento actual del embalse

El comportamiento actual del embalse se estudia con ayuda de las medidas de campo y de los resultados del modelo numérico implantado. La Figura 2 muestra la evolución temporal de los perfiles térmicos medidos en la plataforma (figura superior), de las estimaciones de tiempo de residencia del agua en la misma localización (figura media) y del régimen hídrico del periodo de análisis (figura inferior). Estas gráficas denotan la influencia que ejerce el régimen de manejo actual de los trasvases que afectan al embalse sobre el comportamiento térmico e hidrodinámico del mismo.

La profundidad del embalse en el punto de medida del perfilador oscila entre 38 y 70 m en función, principalmente, de la operación de los trasvases de entrada desde Las Rozas y salida hacia Las Ondinas (Figura 2 inferior). Matalavilla es un embalse de tipo monomítico cálido, que desarrolla una sucesión anual de mezcla invernal y estratificación térmica estival (Figura 2 superior). La peculiaridad de su comportamiento térmico reside en la formación, durante la estratificación, de dos termoclinas o máximos gradientes de temperatura en profundidad. La primera se origina en superficie por la intensificación del calor entrante desde la atmósfera en primavera y verano, y se estabiliza a una profundidad de 10-15 m de mediados de julio a mediados de septiembre. Durante los meses de mayo, junio y septiembre se observa cómo la operación del trasvase de entrada de Las Rozas debilita (primavera) e incluso rompe (septiembre) esta termoclina. La segunda termoclina, de profundidad variable entre los 30 y 50 m, es de origen hidrodinámico y se genera bajo la cota de captación de Las Ondinas, de la cual permanece aproximadamente equidistante, y confina una masa de agua fría y estable en el fondo del embalse de mediados de mayo a finales de noviembre.

El tiempo de residencia del agua en el embalse (Figura 2 media) es un resultado del modelo numérico y se define como el tiempo que lleva cada parcela de la columna de agua en el embalse desde el inicio de la simulación (igual a cero para toda la columna de agua el día 1 de abril). Los gradientes que presenta esta variable en profundidad indican las zonas de circulación del agua en el embalse. Durante las épocas con presencia de estratificación térmica y operación de trasvases, se produce una zona de circulación preferente Las Rozas-Matalavilla-Las Ondinas a profundidades intermedias, localizada entre las dos termoclinas anteriormente identificadas.

Las estimaciones del modelo numérico en el eje longitudinal del embalse muestran homogeneidad de temperaturas del agua en esta dirección, resultando en isotermas horizontales como se puede observar en la Figura 3. Por tanto, el comportamiento térmico obtenido para la plataforma multiparamétrica se puede aplicar al resto del embalse de Matalavilla hasta la profundidad máxima que corresponda en función de la localización. El tiempo de residencia del agua en el embalse sí presenta gradientes longitudinales asociados a la circulación desde el desagüe de Las Rozas (distancia a la presa 1500 m, cota 921) hacia la toma de Las Ondinas (junto a la presa, cota 904), como se observa en la Figura 4.

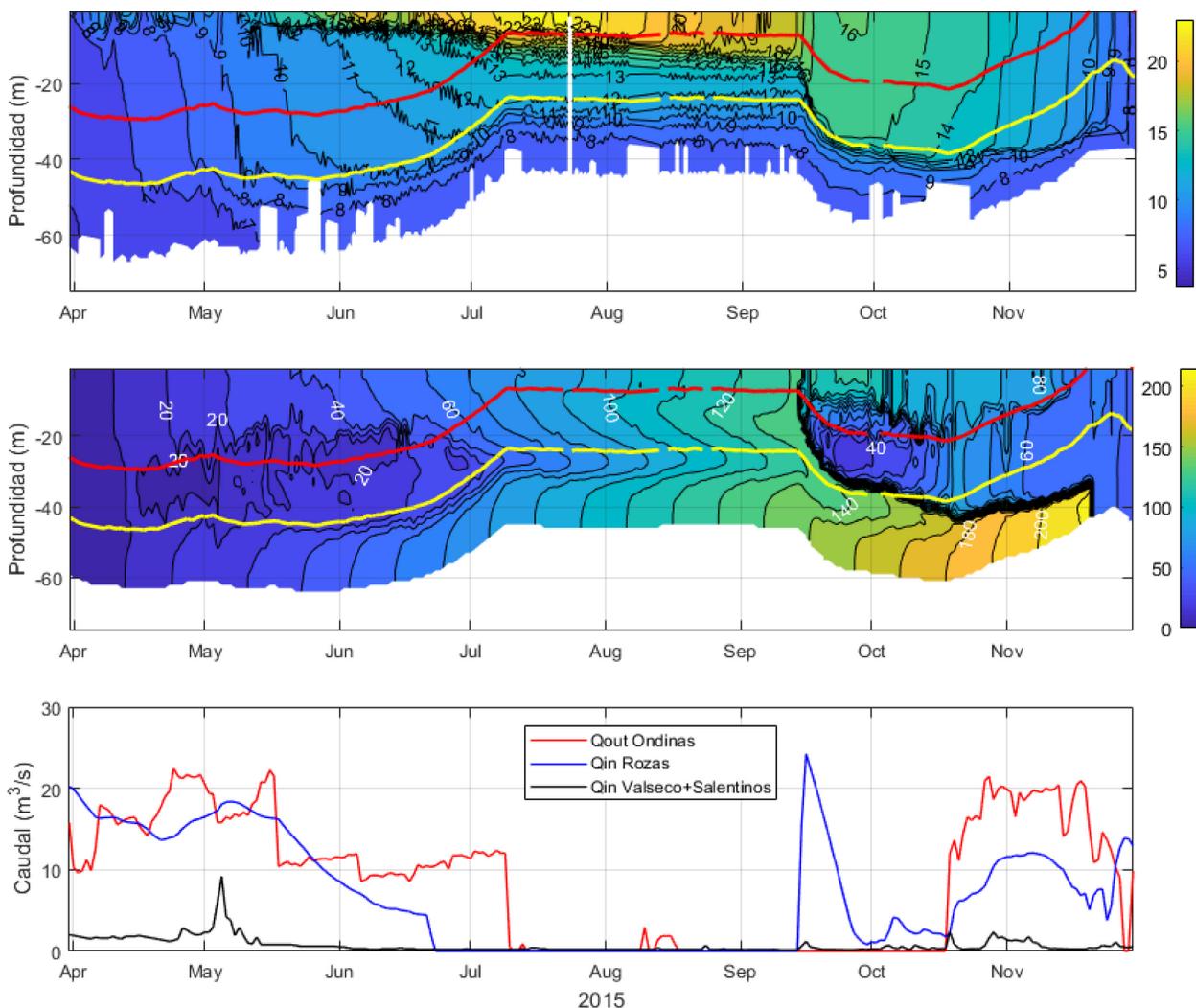


Figura 2 | Superior: Perfiles diarios de temperatura del agua medidos por la plataforma multiparamétrica en Matalavilla. Se indican las profundidades de las estructuras de entrada de caudal procedente de Las Rozas (línea roja) y de salida hacia Las Ondinas (línea amarilla). Medio: Perfiles diarios de tiempo de residencia del agua en el embalse simulados en la localización de la plataforma. Se indican las profundidades de las estructuras de entrada de caudal procedente de Las Rozas (línea roja) y de salida hacia Las Ondinas (línea amarilla). Inferior: Caudales diarios de entrada (Qin) y salida (Qout) en el embalse de Matalavilla.

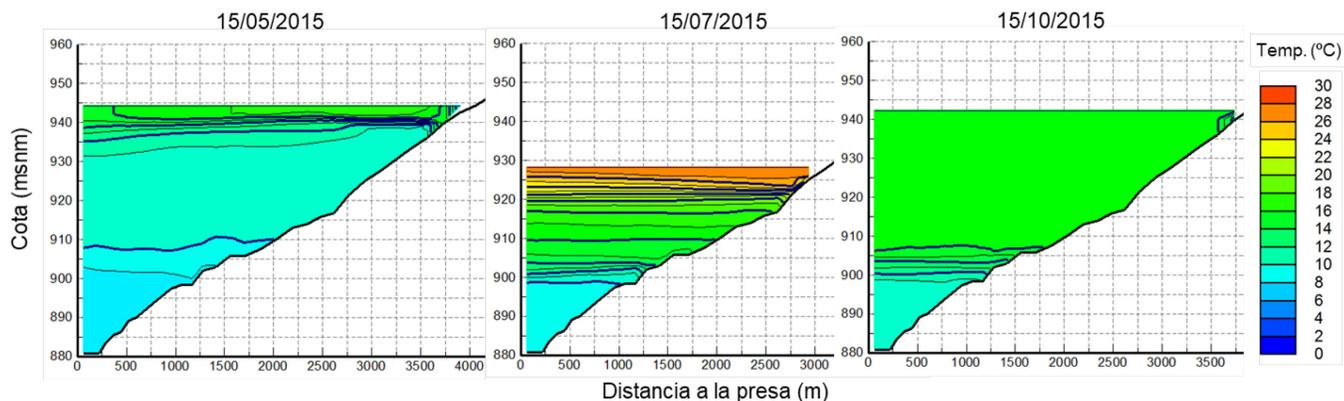


Figura 3 | Perfiles longitudinales de temperatura del agua en Matalavilla simulados por el modelo CE-QUAL-W2 en ausencia de central reversible.

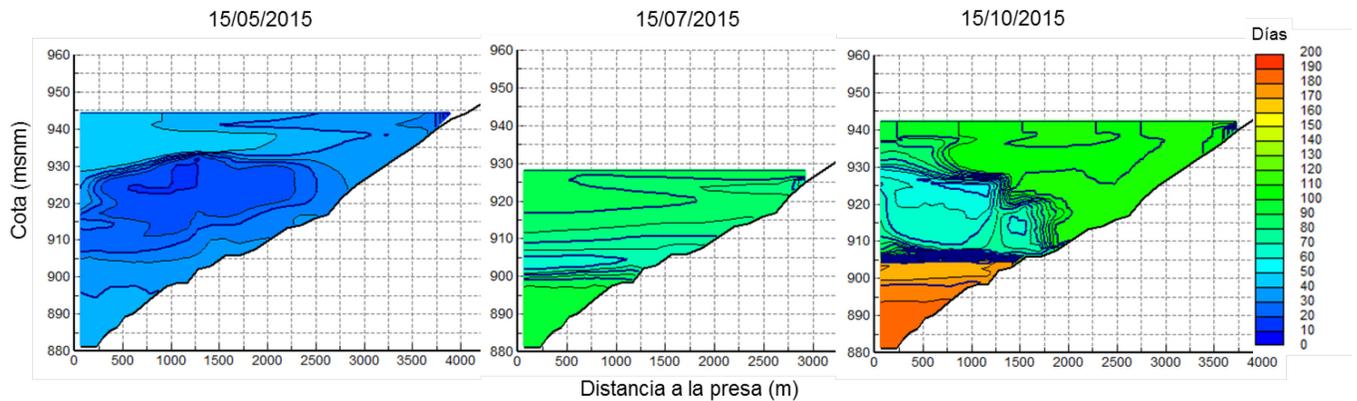


Figura 4. Perfiles longitudinales de tiempo de residencia del agua en Matalavilla simulados por el modelo CE-QUAL-W2 en ausencia de central reversible.

Influencia térmica e hidrodinámica de la implementación de la central hidroeléctrica reversible

El régimen térmico estimado del embalse de Matalavilla en presencia del futuro aprovechamiento reversible se muestra en la Figura 5. En comparación con la situación actual (Figura 2 superior), este escenario conduce al calentamiento y homogeneización de la columna de agua a profundidades intermedias durante la estratificación, si bien el efecto varía con la profundidad y la época del año. La principal diferencia de temperatura del agua entre ambos escenarios se produce en torno a la posición de la termoclina profunda en la época en que ésta se desarrolla, de mediados de mayo a mediados de noviembre. La circulación ocasionada por la central reversible provoca la mezcla de aguas profundas en torno a la cota donde se localizan las estructuras de toma y descarga (898 msnm), que coincide con la posición de la termoclina profunda en ausencia de central (900 msnm). Ello, más la incorporación de calor atmosférico al agua en la balsa superior, resulta en un calentamiento de este estrato de la columna de agua, así como en el descenso y fortalecimiento de la termoclina profunda en las áreas del embalse cercanas a la presa. El impacto térmico es más intenso en los meses de verano, cuando el embalse presenta mínimos volúmenes acumulados y los trasvases de Las Rozas y Las Ondinas se encuentran cerrados. En términos de temperatura media volumétrica del embalse, se produce un incremento del 5 al 17 % entre los meses de julio y octubre, siendo máximo a principios de septiembre antes de la reanudación del trasvase de entrada desde Las Rozas (Figura 7A). El impacto sobre el calor total acumulado en el embalse, sin embargo, es más reducido e inferior al 3 % (Figura 7B).

Los tiempos de residencia del agua en el sistema se estiman de manera conjunta para ambos embalses. Dada la alta tasa de renovación del depósito superior, el tiempo de residencia global se ve poco afectado por el funcionamiento de la central reversible (Figura 6 superior). La principal diferencia con respecto a la situación actual es la renovación más temprana de las aguas profundas del embalse entre los meses de septiembre y noviembre (Figura 6 inferior).

La estabilidad térmica de la columna de agua se ve sensiblemente reducida por la homogeneización vertical de temperaturas ocasionada por el funcionamiento de la central reversible (Figura 7C). En este escenario, se alcanza la máxima estabilidad térmica a finales de junio y se adelanta aproximadamente un mes y medio el descenso de estabilidad que conduce a la mezcla. Este adelanto se observa en la rotura temprana de ambas termoclinas en comparación con el escenario actual (Figura 2, Figura 5).

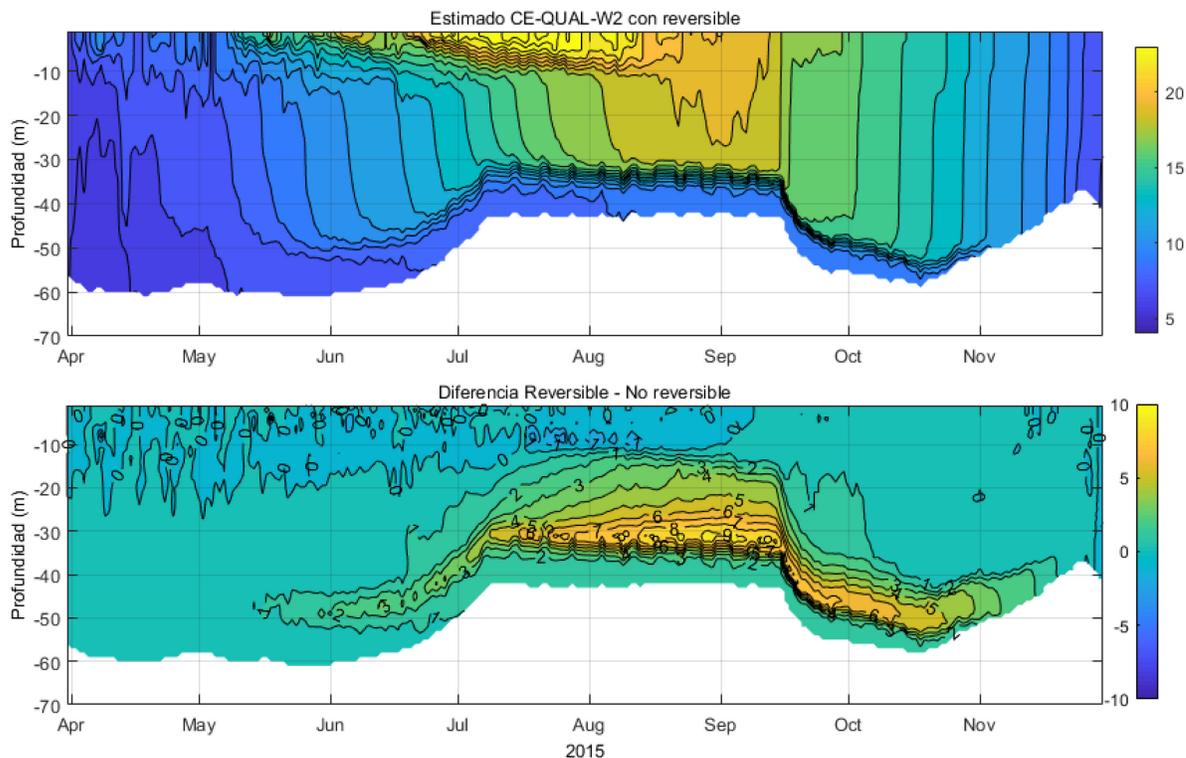


Figura 5 | Superior: Perfiles térmicos diarios en la localización de la plataforma multiparamétrica estimados por el modelo en presencia de la central reversible. Inferior: Diferencia de temperatura del agua entre los escenarios con presencia y ausencia de central reversible en la localización de la plataforma multiparamétrica.

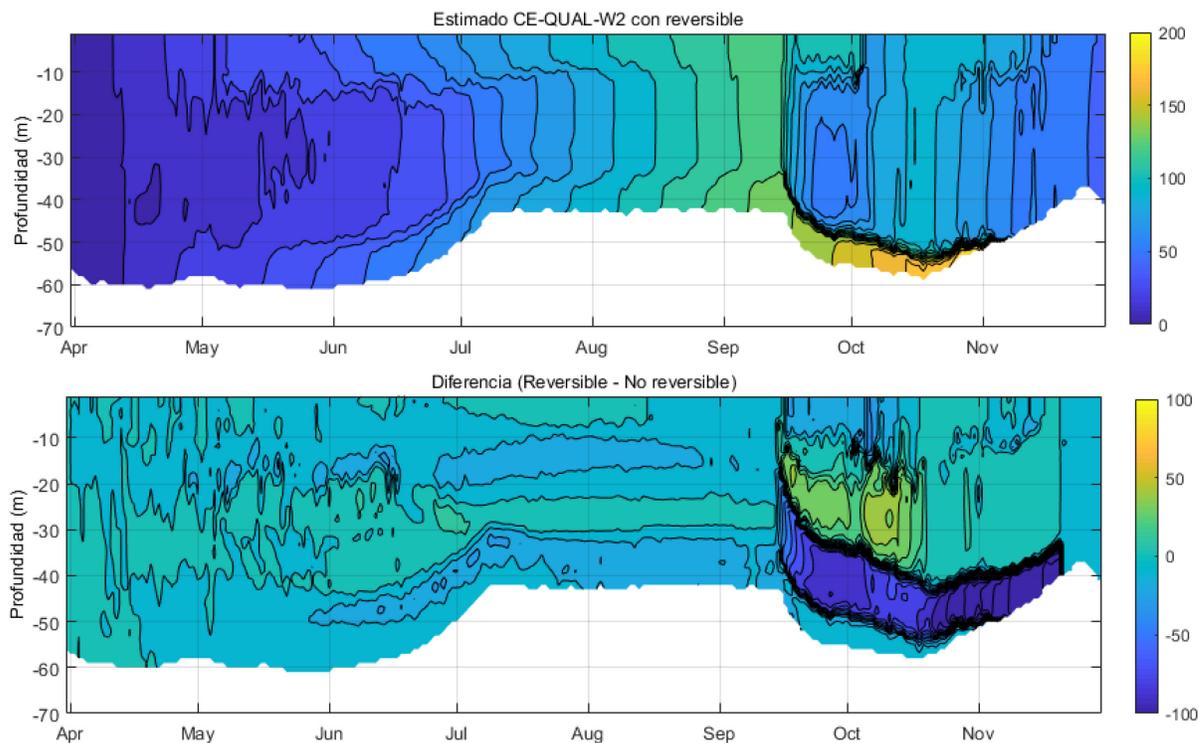


Figura 6 | Superior: Perfiles diarios de tiempo de residencia del agua en la localización de la plataforma multiparamétrica estimados por el modelo en presencia de la central reversible. Inferior: Diferencia de tiempo de residencia del agua entre los escenarios con presencia y ausencia de central reversible en la localización de la plataforma multiparamétrica.

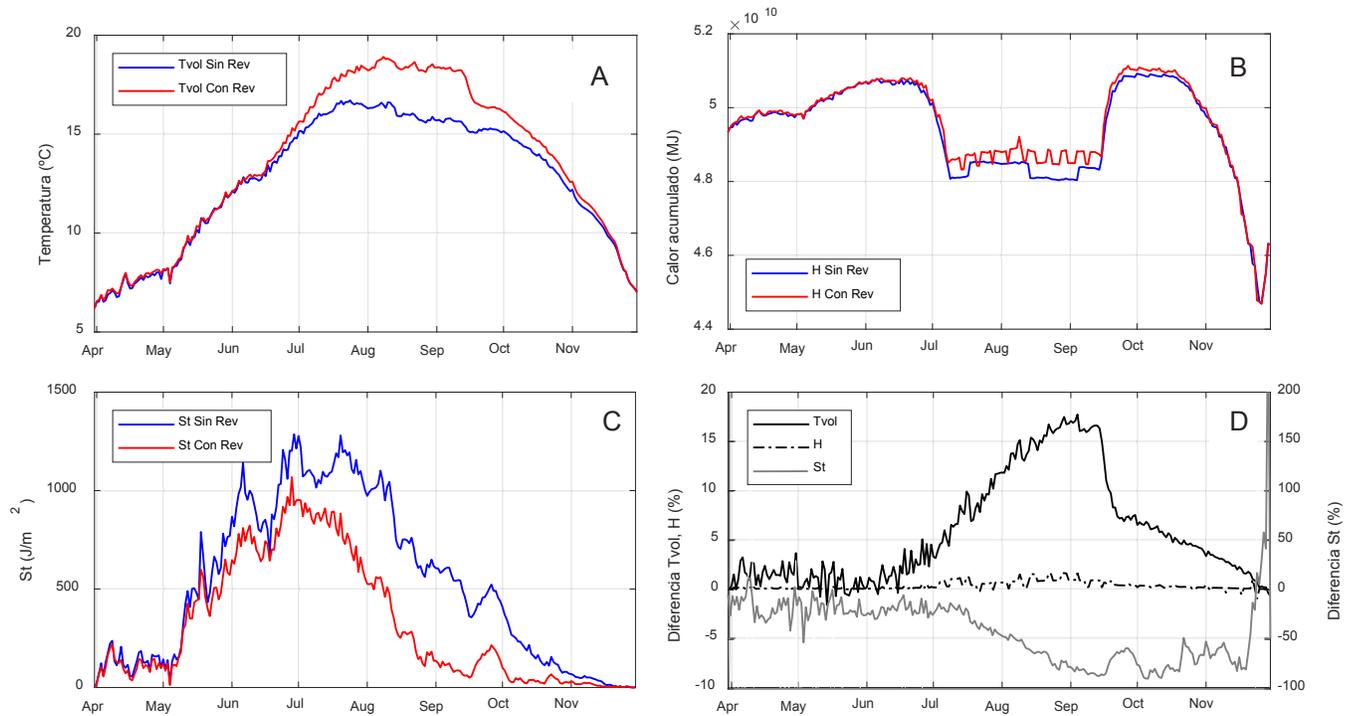


Figura 7 | Comparación de escenarios en presencia (Con Rev) y ausencia (Sin Rev) de central reversible en Matalavilla. A: Temperatura media volumétrica del embalse; B: Calor total acumulado en el embalse; C: Estabilidad térmica (parámetro de estabilidad de Schmidt); D: Diferencias relativas de las variables anteriores (Diferencia relativa = (Con Rev – Sin Rev)/Sin Rev).

CONCLUSIONES

Este trabajo recoge el estudio del comportamiento térmico e hidrodinámico del embalse de Matalavilla en sus condiciones actuales y bajo la influencia del funcionamiento de un futuro aprovechamiento hidroeléctrico reversible proyectado que lo utilizaría como depósito inferior.

Teniendo en cuenta la absoluta relevancia del ciclo térmico anual de los embalses sobre sus características limnológicas, el uso de modelos numéricos como el adoptado en este estudio, constituye una herramienta eficaz en la simulación del impacto ambiental de este tipo de obras hidráulicas sobre la estructura hidrodinámica y la estructura térmica de las masas de agua embalsadas, de la que pueden inferirse aspectos relevantes sobre su organización biológica.

De acuerdo con los resultados obtenidos, cabe concluir que el modelo numérico CE-QUAL W2 utilizado permite una simulación suficientemente precisa de los cambios esperables a partir de una eventual ejecución y puesta en funcionamiento del aprovechamiento hidroeléctrico reversible proyectado.

En el presente caso, el escenario simulado conduciría a la homogeneización y calentamiento de cotas intermedias de la columna de agua durante la estratificación, así como a la reducción del volumen de agua aislada de la circulación en profundidad. Se estima escasa incidencia en el calor total acumulado en el embalse y, sin embargo, un descenso importante de la estabilidad térmica de la columna de agua, que conduce a una mezcla anticipada del mismo. Los efectos tienen mayor incidencia en los meses de verano, cuando no operan los trasvases actuales y el volumen almacenado es mínimo. En estas condiciones, sería recomendable atender a la temperatura del agua a la altura de la cota de salida del embalse de Matalavilla hacia el río Sil para minimizar posibles efectos aguas abajo del mismo al reanudar el trasvase.

Cabe indicar, no obstante, que los impactos estimados para la central reversible proyectada en Matalavilla dependen de la gestión adoptada en la simulación llevada a cabo y, por tanto, no pueden ser extrapolados a escenarios hidrológicos diferentes. Así, una gestión distinta del balance estival de agua cambiaría significativamente los impactos térmicos e hidrodinámicos estimados. Probablemente, los futuros esfuerzos de modelización de este tipo de obras hidráulicas deberían profundizar en el papel desempeñado por el volumen almacenado y el tiempo de residencia en verano como variables clave.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por ENDESA, S.A., dentro del proyecto «Estudio hidrodinámico del embalse de Matalavilla». Los autores desean agradecer a D. Niñerola, J. Pomares, X. Martínez y M. Griñón del Instituto Flumen su ayuda en la instalación y mantenimiento de la instrumentación de medida, así como a R. Poncelas y al personal de la Unidad de Producción Hidráulica Noroeste de ENDESA por su útil colaboración.

REFERENCIAS

- Cole, T. M., Wells, S. A. 2015. *CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, version 3.72*, Portland State University, Portland, USA.
- Gimeno-Gutiérrez, M., Lacal-Arántegui, R. 2013. *Assessment of the European potential for pumped hydropower energy storage. A GIS-based assessment of pumped hydropower storage potential*, Joint Research Centre of the European Commission, Luxembourg.
- IDAE. 2011. *Plan de Energías Renovables 2011-2020*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Madrid, España.
- Idso, S. B. 1973. On the concept of lake stability. *Limnology and Oceanography* 18(4), 681–683.
- Prats Rodríguez, J., Morales Baquero, R., Dolz Ripollés, J., Armenol Baquero, J. 2014. Aportaciones de la limnología a la gestión de embalses. *Ingeniería del agua* 18(1), 83–97.
- Ramos-Fuertes, A., Palau, A., Dolz, J. 2017. Application of a two-dimensional water quality model (CE-QUAL-W2) to the thermal impact assessment of a pumped-storage hydropower plant project in a mountainous reservoir (Matalavilla, Sil River, Spain). *SimHydro 2017: Choosing the right model in applied hydraulics*, 14-16 June, Sophia Antipolis, Nice, France.
- Read, J. S., Hamilton, D. P., Jones, I. D., Muraoka, K., Winslow, L. A., Kroiss, R., Wu, C. H., Gaiser, E. 2011. Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data. *Environmental Modelling & Software* 26(11), 1325–1336.
- Schmidt, W. 1928. Über die Temperatur- und Stabilitätsverhältnisse von Seen. *Geografiska Annaler* 10, p.145.
- Wilhelmi Ayza, J. R. 2013. El papel de la hidroelectricidad en el contexto de las energías renovables en España. *Revista de Obras Públicas* 160(3548), 35–42.