

Desarrollo en laboratorio de un sistema de detección temprana de fugas en balsas mediante tecnología de fibra óptica

Development in laboratory of a system for early detection of leakage in ponds using fiber optical technology

Diego Antolín-Cañada ^{a1}, Pedro Luis López-Julián ^{a2}, Javier Pérez-Esteras ^{a3},
Juan Carlos Sánchez-Catalán ^{a4}, Alejandro Acero-Oliete ^{a5} y Beniamino Russo ^b

^a Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia (EUPLA) – C/ Mayor 5, 50100 La Almunia (Zaragoza), España.

^b Flumen Research Institute, Universitat Politècnica de Catalunya – BarcelonaTech (UPC), Campus Nord, Jordi Girona 1-3, 080043, Barcelona, España.

E-mail: ^{a1}dantolin@unizar.es, ^{a2}pllopez@unizar.es, ^{a3}jpereze@unizar.es, ^{a4}jucasan@unizar.es, ^{a5}acero@unizar.es, ^bbeniamino.russo@upc.edu

*Autor para correspondencia

Recibido: 04/07/2023

Aceptado: 24/07/2023

Publicado: 31/07/2023

Citar como: Antolín-Cañada, D., López-Julián, P. L., Pérez-Esteras, J., Sánchez-Catalán, J.C., Acero-Oliete, A., Russo, B. 2023. Development in laboratory of a system for early detection of leakage in ponds using fiber optical technology. *Ingeniería del agua*, 27(3), 211-221. <https://doi.org/10.4995/la.2023.19991>

RESUMEN

Este artículo presenta los resultados obtenidos en laboratorio para el desarrollo de un sistema de detección temprana de fugas en balsas, mediante una solución tecnológica basada en el uso de fibra óptica colocada como sensor distribuido de temperatura en el subsuelo de apoyo de la propia balsa. El sistema de monitorización incorpora un cable continuo de fibra óptica conectado a un interrogador, registrándose la información térmica a lo largo de la fibra con una resolución espacial mínima de 20 cm, tras la aplicación de un pulso térmico que amplifica la respuesta del sistema (monitorización activa). Los ensayos permitieron registrar gradientes térmicos superiores a 6 °C que, en las diferentes condiciones hidráulicas simuladas, posibilitan interpretar la situación hidráulica del sustrato a lo largo de la fibra óptica con resolución espacial considerada y localizar de este modo las posibles fugas de agua de las balsas, verificando la adecuación de la metodología propuesta a los objetivos planteados.

Palabras clave | balsas, fugas, detección temprana, fibra óptica, monitorización activa.

ABSTRACT

This paper presents the results obtained in the laboratory for the development of an early leak detection system in slurry storage ponds, through a technological solution based on the use of optical fiber placed as a distributed temperature sensor in the support subsoil of the pond itself. The monitoring system incorporates a continuous fiber optic cable connected to an interrogator and measures the temperature along the fiber with a minimum spatial resolution of 20 cm, after applying a thermal pulse that amplifies the system's response (active monitoring). The different tests performed made it possible to record thermal gradients greater than 6 °C which, in the different simulated hydraulic conditions, allow to interpret the hydraulic situation of the substrate along the optical fiber and thus locate possible water leaks from the storage ponds, thus verifying the adequacy of this methodology to the proposed objectives.

Key words | ponds, leakage, early detection, optical fiber, active monitoring.

INTRODUCCIÓN

Las balsas son infraestructuras de almacenamiento en el ámbito agropecuario y que pueden proyectarse tanto para contener agua para riego como para acumular purines en explotaciones ganaderas. En cualquier caso, las pérdidas del elemento fluido que se almacena en ellas son muy frecuentes, e implican disminución de los recursos hídricos disponibles en el caso de instalaciones para riego. Por otra parte, en el caso de balsas de residuos ganaderos, las pérdidas y su consiguiente infiltración en el subsuelo constituyen un riesgo evidente de contaminación del medio hídrico subterráneo y superficial, siendo el de los purines el ejemplo más evidente.

A diferencia de las presas, las balsas convencionales no disponen de sistemas de vigilancia y auscultación que permita ni la supervisión de su estado estructural ni la detección temprana de fugas. En el caso específico de las balsas destinadas para almacenar purines, el documento europeo normativo de referencia sobre las mejores técnicas disponibles a aplicar para la ganadería intensiva de porcino y avicultura de carne (BREF, 2017) establecía la necesidad de comprobar anualmente la integridad estructural de las balsas de purines existentes, dado que no disponían de los sistemas de detección de fugas que ya se requieren a las de nueva construcción.

Por todo ello, la detección temprana de una posible pérdida de líquidos almacenados en una balsa y la localización del punto o puntos donde tiene lugar, constituyen un campo de investigación de evidente interés en la explotación de estas infraestructuras hídricas, tanto desde una perspectiva económica como medioambiental. En este contexto, se ha planteado el desarrollo de un sistema de monitorización para la detección temprana de fugas en balsas a través de una solución tecnológica innovadora basada en el uso de la fibra óptica, entendida como sensor distribuido de temperatura (*Distributed Temperature Sensor*, DTS) a desplegar en el subsuelo en el que se apoya la propia balsa, y que es la única tecnología de sensores disponible actualmente capaz de proporcionar medidas térmicas con suficiente resolución espacial en el subsuelo a largas distancias (Schenato, 2017).

El análisis termométrico para monitorizar las filtraciones de agua asociadas a obras hidráulicas se planteó ya en 1957 por Kappelmeyer, basándose en el análisis de los procesos de transferencia de calor que tenían lugar en el subsuelo, pero los avances tecnológicos, sobre todo en el desarrollo de la fibra óptica y de sus múltiples aplicaciones, están permitiendo que esta tecnología se aplique como complemento a los sensores convencionales empleados en sistemas de auscultación de presas, para así subsanar dos de sus inconvenientes principales: el carácter puntual de las mediciones y la detección tardía, que muchas veces tiene lugar ya cuando los procesos de inestabilidad de un talud o de filtración en el cuerpo de la presa están demasiado avanzados, con impactos ambientales significativos y riesgo potencial de deterioro irreversible de la infraestructura (Muñoz *et al.*, 2016; Čejka *et al.*, 2018; Ghafoori *et al.*, 2020; Sánchez *et al.*, 2022). El uso de fibra óptica se ha aplicado además en otros tipos de obras hidráulicas con el objetivo de detectar cualitativa y cuantitativamente las posibles filtraciones de agua (Leng *et al.*, 2007; Ukil *et al.*, 2012), pero las características específicas de cada tipología de obra necesitan una definición previa de las condiciones de medida, adaptadas a cada situación particular (Xiao y Cai, 2008). Además, existen metodologías de medición de las variaciones térmicas naturales (monitorización pasiva), pero en el presente trabajo se ha desarrollado un sistema mediante el cual se induce un gradiente térmico adicional y que constituye una metodología de tipo activo, del cual se ofrecerán los detalles del prototipo de laboratorio diseñado y construido, las especificaciones técnicas del sistema de detección y los resultados relativos a la verificación de su capacidad de identificación de posibles fugas en balsas, obras hidráulicas para las cuales no se han encontrado trabajos específicos de investigación en la bibliografía consultada. La aplicabilidad de los resultados de la presente investigación resulta evidente si se tiene en cuenta que existen más de 50 000 balsas para riego en España, y que el número total de explotaciones porcinas en nuestro país es de unas 34 600, según la actualización más reciente del censo agrario (Instituto Nacional de Estadística, 2020).

MATERIAL Y MÉTODOS

Descripción del banco de ensayos

Para verificar el funcionamiento óptimo del sistema de detección de fugas en balsas, se ha desarrollado un banco de ensayos en el laboratorio de Hidráulica de la Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia, cuyo esquema conceptual se muestra en la Figura 1 junto a la fotografía del mismo durante la fase de mediciones.

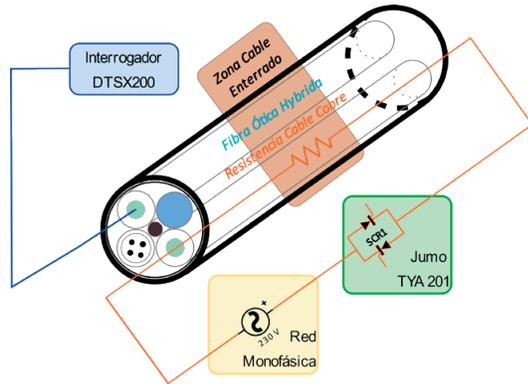


Figura 1 | Diagrama esquema del banco de ensayos (izquierda) y vista del dispositivo experimental en laboratorio (derecha).

En este diagrama se pueden apreciar dos subsistemas; el primero de ellos es el interrogador DTSX200 de Yokogawa, que va conectado a la fibra óptica y que permite, mediante el efecto RAMAN, determinar la temperatura de la fibra con una resolución espacial que puede variar desde 1 m hasta los 10 cm, y una precisión térmica de 0.3°C para un rango de 1 km de longitud de cable y una periodicidad de medida de 1 minuto.

Dadas las dimensiones del banco de ensayos de laboratorio aquí desarrollado (con una longitud enterrada de 2.10 m), la resolución empleada es de 20 cm, de manera que se tendrán 10 puntos de medida en condiciones enterradas, siendo la longitud total de la fibra óptica empleada de 35 m. La Figura 2 muestra el interrogador conectado al ordenador que ejecuta el software que permite recoger la información de las temperaturas en los diferentes puntos de la fibra. Es de reseñar que la fibra óptica utilizada para la medida de estos sistemas es una fibra óptica híbrida, es decir, además de los cables de fibra óptica lleva encapsulado uno o varios cables de cobre, como se observa en la Figura 2. Este cable tiene una particularidad de incorporar cuatro fibras y cuatro cables de cobre en su interior, lo que va a permitir no sólo realizar las mediciones de temperatura, sino poder suministrar el pulso térmico para analizar el comportamiento del terreno alrededor de la fibra enterrada y a lo largo de toda la longitud monitorizada.

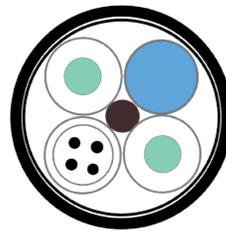


Figura 2 | Izquierda: Interrogador DTSX200 conectado al equipo de adquisición de datos. Centro y derecha: Esquema de la estructura interna y fotografía de la fibra óptica empleada A-DSQ(ZN)B2Y hybrid.

El segundo subsistema es un dispositivo que permite incrementar la temperatura de la fibra, puesto que van a ser las diferencias en los gradientes térmicos registrados en la misma los que van a permitir la detección de fugas en las balsas. Para ello se hace uso de la propia resistencia de los cables de cobre integrados en la manguera de fibra óptica híbrida y un dispositivo electrónico que permita controlar la potencia que pasa por los mismos; este dispositivo electrónico es un tiristor industrial Jumo TYA 201, que ataca a la resistencia del cable con la red eléctrica monofásica de distribución y cuyo esquema electrónico se representa en la Figura 3.

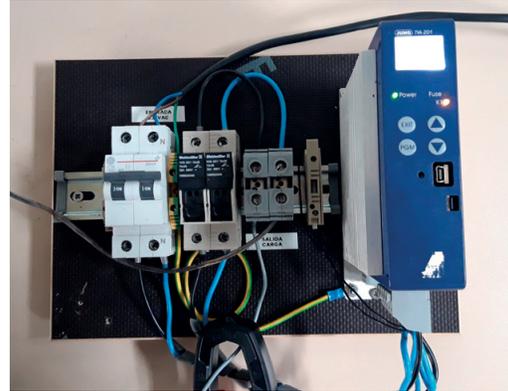
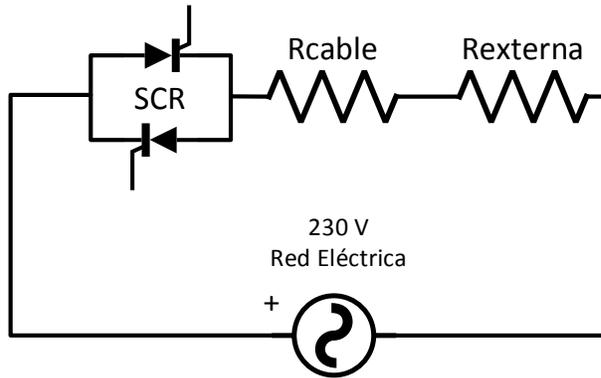


Figura 3 | Esquema eléctrico del circuito de excitación y fotografía del tiristor (Jumo TYA 201) de control con las protecciones necesarias para su correcto funcionamiento.

El sistema de excitación eléctrico proporciona un pulso térmico a la fibra. Según Gil-Rodríguez *et al.* (2013) debe de tener una potencia de 10 W/m, mientras que Yao *et al.* (2022) indican que esta potencia debe ser de 30-40 W/m. En el sistema aquí desarrollado se ha adoptado una potencia de 10 W/m, habiéndose comprobado suficiente para poder medir fugas en las presentes condiciones experimentales, de acuerdo con las conclusiones de Su *et al.* (2019) en un trabajo llevado a cabo en condiciones similares al presente. Siendo 35 m la longitud total del cable de la instalación en laboratorio (de los cuales 2.10 m se encuentran enterrados), con la Ecuación (1) se calcula la resistencia del cable:

$$R = \rho \cdot L/A \quad (1)$$

siendo ρ la resistividad del cobre, L la longitud del cable y A su sección.

En estas condiciones se obtiene que la resistencia del cable es de 1.35 Ω , midiendo de forma experimental, teniendo en cuenta los conexiones realizadas en el sistema esta resistencia es de 2.4 Ω . Por otro lado, si el pulso térmico tiene una potencia de 10 W/m la potencia eléctrica a entregar es de 350 W. Para que sistema electrónico de la Figura 3 pueda proporcionar estos requerimientos es necesario añadir una resistencia de carga externa que aumente el valor resistivo del conjunto hasta los 20 Ω . La potencia proporcionada al cable híbrido viene definida por la Ecuación (2):

$$P = I_{Cable\ H\u00edbrido}^2 \cdot R_{Cable\ H\u00edbrido} = \left(\frac{V_{RED}}{R_{Cable\ Total}} \right)^2 \cdot R_{Cable\ H\u00edbrido} \quad (2)$$

En estas condiciones la potencia proporcionada es de 317 W, próxima a los valores deseados.

La parte del banco de ensayos encargada de simular las condiciones de la fibra enterrada bajo la balsa consiste en un recipiente de metacrilato de 2.10 m de longitud, 0.30 m de ancho y 0.35 m de altura (cuyo aspecto general se recoge en la Figura 1, derecha), dentro del cual se han dispuesto una serie de elementos para recrear las condiciones reales de una balsa tipo, y un dispositivo de suministro de agua desde su superficie. Así, en la parte inferior se ha dispuesto un lecho de gravas con elevada permeabilidad, que simula el comportamiento hidráulico de los drenes de fondo de las balsas y que permiten evacuar el agua infiltrada, por encima del cual se ha colocado una lámina geotextil para evitar que la arena y las gravas suprayacentes colmaten la zona inferior de drenaje. Por encima, una capa de sustrato granular consistente en una zahorra (gravas tipo GP según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos; Lambe y Whitman, 1969) con contenido en finos inferior al 5% y cuya granulometría se presenta en la Figura 4, la cual va a alojar el tramo de fibra óptica enterrada. Finalmente, sobre la capa de zahorra se ha dispuesto una lámina de polietileno simulando la presencia del material impermeable de la balsa, que permitirá recrear los ensayos de laboratorio en condiciones muy similares a las de una balsa real.

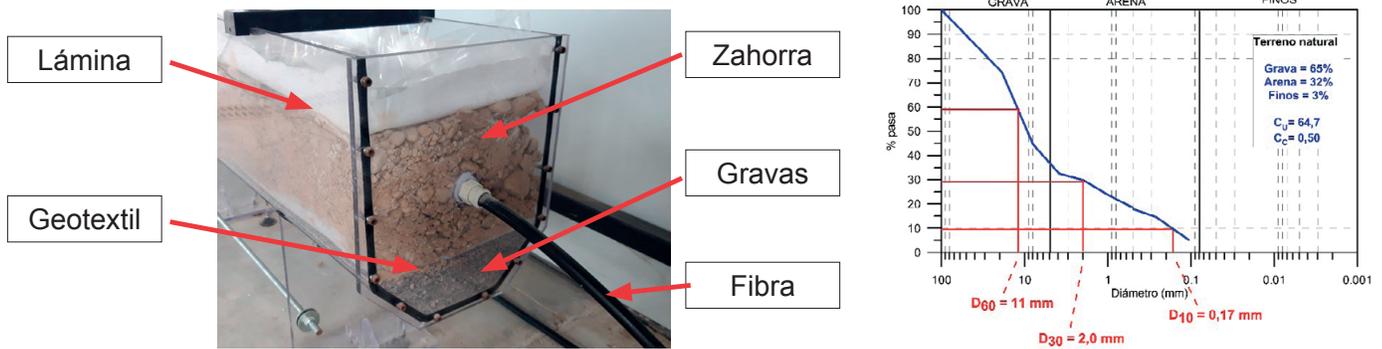


Figura 4 | Imagen del dispositivo experimental que simula la disposición de la fibra en el sustrato de una balsa, con la estructura interna descrita en el texto (izquierda), y curva granulométrica de la zahorra empleada que simula el subsuelo en el que se aloja la fibra óptica (derecha)

Condiciones de realización de los ensayos

Los diferentes ensayos se llevaron a cabo siguiendo un protocolo homogéneo, de manera que los resultados obtenidos pudieran ser comparables entre sí y representativos de las diferentes condiciones experimentales bajo las cuales se realizaron. El protocolo seguido fue el siguiente: se midió inicialmente la temperatura de la fibra durante 30 minutos para obtener un registro estable y fiable a lo largo de toda la fibra óptica (con una resolución espacial de 20 cm); a continuación, se activó el pulso térmico durante 45 minutos, monitorizándose continuamente la temperatura de la fibra; finalmente, transcurridos estos 45 minutos, se detuvo el pulso térmico y se continuó monitorizando la temperatura en la fibra para obtener datos durante el proceso de enfriamiento a lo largo de 30 minutos. A partir de los resultados obtenidos, se ha podido comprobar que los intervalos temporales asignados a cada una de las fases operativas son suficientes para alcanzar la estabilidad térmica del sistema.

Para los ensayos se plantearon tres situaciones diferentes: la primera de ellas, con el banco completamente seco, ha servido como marco de referencia para los ensayos posteriores; una segunda, en la que la zahorra se encontraba en estado húmedo tras haberse humectado parcialmente el banco de ensayos; y como tercera y última, la situación más próxima a las condiciones reales de una balsa, se ha simulado una pérdida de agua continua desde la zona superior, la cual ha percolado a través del volumen de material granular, saturándolo por completo y llegando en su descenso a un lecho inferior de grava muy permeable que ha permitido su drenaje. Así, en este modelo de dimensiones finitas se ha simulado el efecto que tendría una pérdida de agua sin apenas limitación en la vertical del subsuelo una vez saturado el sustrato donde se apoya la balsa.



Figura 5 | Modelo de simulación a escala del sustrato empleado para los ensayos (izquierda). Izquierda y centro, detalle del ensayo de humectación parcial del sustrato de tierra que aloja la fibra óptica. Derecha, ensayo con sustrato saturado y flujo de agua constante.

Durante los ensayos, el interrogador DTSX200 permitió la lectura de la temperatura instantánea a lo largo de la fibra con una resolución de 20 cm. En ausencia de pulso térmico, es decir, sin calentamiento previo mediante los cables de cobre, las medidas

mostraron una variación no superior a $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre aquellos puntos que se encontraban en las mismas condiciones ambientales, lo que permitió verificar que la precisión en las lecturas que hace el interrogador es suficiente para los objetivos del presente trabajo.

RESULTADOS

Como ya se ha indicado en la sección anterior, las primeras pruebas en laboratorio consistieron en tomar medidas con el sustrato en seco, registro térmico que se empleó como referencia para poder comparar posteriormente los resultados obtenidos en condiciones de sustrato húmedo y saturado en agua. El termograma que muestra el incremento térmico en condiciones de referencia, es decir, en seco, se muestra en la Figura 6.

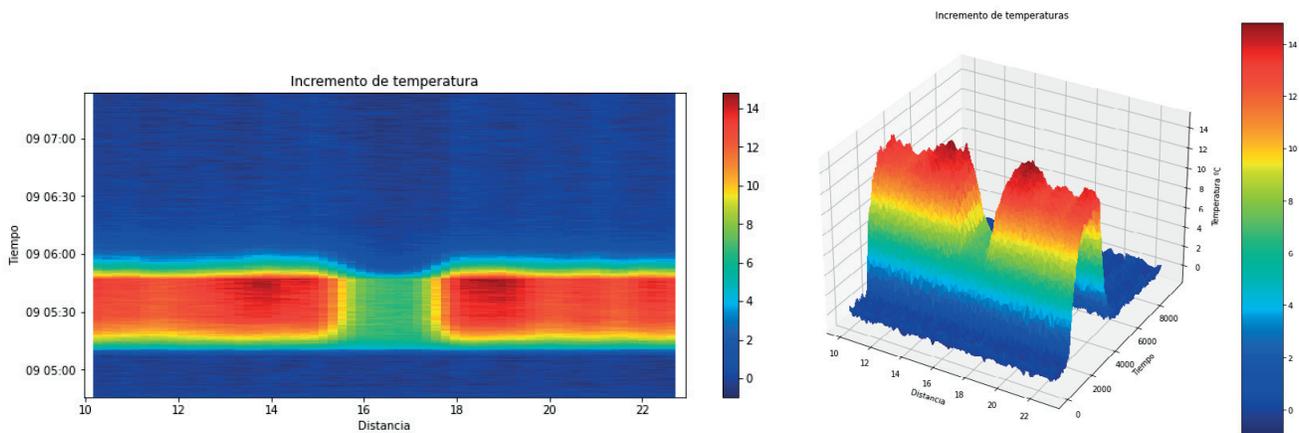


Figura 6 | Termograma en condiciones de sustrato seco con pulso térmico: (izquierda) 2D y (derecha) 3D.

En los termogramas se representan, en abscisas, los diferentes puntos de lectura distribuidos a lo largo de la fibra, que se indican según la distancia al interrogador. El gráfico izquierdo de la Figura 6 muestra cómo el incremento de temperatura conseguido con el pulso térmico es significativamente inferior en la zona enterrada de la fibra, que corresponde aproximadamente con los metros 15 a 17. Para cada punto de abscisas se representan, en ordenadas, los valores térmicos registrados a diferentes tiempos, donde cada una de las marcas etiquetadas representa incrementos de 30 minutos. Así, se observa en el gráfico que la disipación térmica del sustrato tras el calentamiento de la fibra provoca, en condiciones de sustrato seco, un gradiente de unos $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre la zona enterrada en zorra y la zona expuesta al aire fuera del dispositivo experimental.

En el gráfico en tres dimensiones, a la derecha de la Figura 6, se visualiza claramente un valle en la zona central de la gráfica, el cual representa el gradiente térmico registrado en el ensayo. La medida mostrada en este gráfico se corresponde con una temperatura ambiente y de la fibra en torno a los $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, pero se ha repetido en diferentes condiciones de temperatura ambiente sin que el comportamiento relativo, es decir, los incrementos térmicos registrados, hayan mostrado diferencias cuantitativas significativas.

En el segundo conjunto de pruebas se simuló la pérdida de agua mediante infiltración desde la zona superior del dispositivo, humedeciéndose aproximadamente la mitad de la longitud del banco de ensayos (véase imagen central en la Figura 5). En la Figura 7 se representa la evolución temporal de los gradientes térmicos registrados en dos puntos distintos de la fibra óptica, uno en la zona enterrada y otro en la zona expuesta al aire (aérea). Observando las curvas correspondientes al ensayo realizado con sustrato seco, la distancia vertical entre las curvas refleja la diferencia de gradiente en $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ que se observaba en la Figura 6 entre la parte enterrada y la aérea, mientras que en condiciones de sustrato húmedo la diferencia térmica es todavía superior, obteniéndose una diferencia de gradiente de $7\text{ }^{\circ}\text{C}$, debido a que la humedad del sustrato permite una mayor disipación térmica. En la misma gráfica se comprueba claramente, observando las geometrías de las curvas obtenidas, que una duración de pulso térmico de 45 minutos es

suficiente para poder alcanzar una temperatura relativamente estable en la fibra, tanto en condiciones húmedas como secas y en zonas aéreas y enterradas.

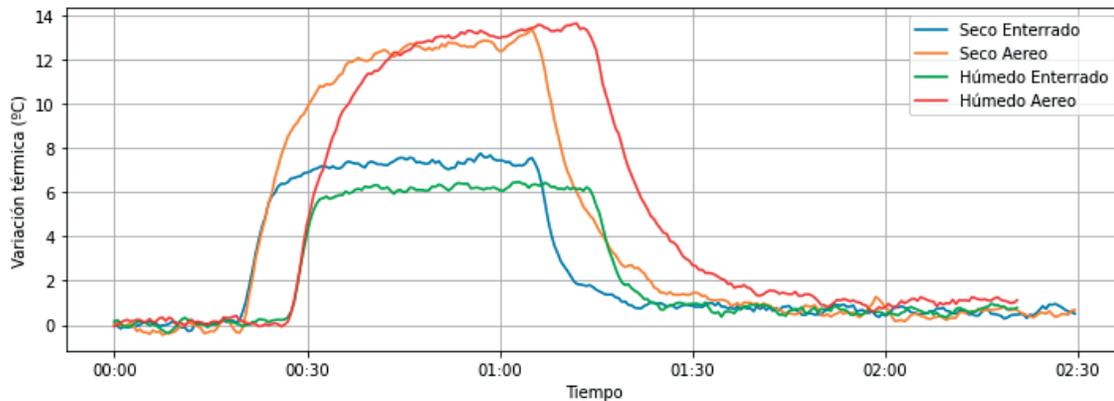


Figura 7 | Resultados de las medidas del pulso térmico en seco y con tierra humectada.

Una vez verificado el funcionamiento del modelo en estas dos primeras pruebas, se pasó a una tercera fase de ensayos donde, mediante el mismo procedimiento operativo, se comprobó el comportamiento diferencial entre el sustrato en estado húmedo y saturado con circulación de flujo de agua durante la ejecución del ensayo, tratando de este modo de simular las condiciones hidráulicas de una fuga real y de caudal significativo, donde el agua aliviará por los drenes de la balsa existiendo un flujo de agua bajo la misma (imagen derecha en la Figura 5). En este caso, se sometió a la fibra óptica a tres pulsos térmicos: el primero de ellos con el sustrato en estado húmedo (P1); el segundo en estado saturado y con un flujo permanente de agua (P2); y un tercero, más corto de duración, cuando en el aliviadero del banco de ensayos deja de caer agua (P3), estando el sustrato todavía saturado en agua.

La Figura 8 muestra el termograma en dos dimensiones de las medidas obtenidas en la secuencia de los tres pulsos térmicos. En él se pueden apreciar cómo existen pequeñas diferencias en las condiciones de flujo de agua con respecto a las otras dos, viéndose que el incremento de temperatura obtenido es inferior cuando existe circulación de agua por el sustrato que rodea a la fibra.

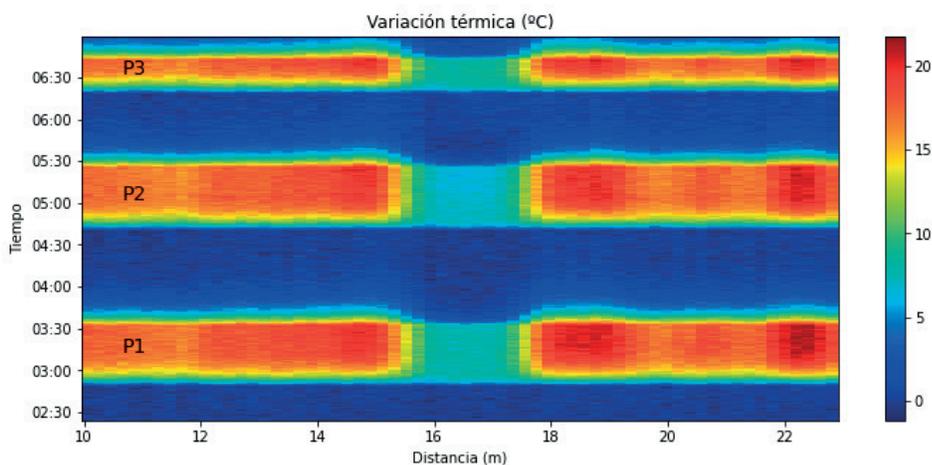


Figura 8 | Termograma 2D con sustrato húmedo (abajo), con flujo de agua constante (centro) y con sustrato saturado, pero sin circulación de flujo.

Para poder analizar cuantitativamente los gradientes registrados bajo las tres condiciones experimentales, en la Figura 9 se representa su evolución temporal en puntos de la fibra situados en la zona enterrada y en la zona aérea; también se ha representado la diferencia de gradientes entre ambos, para poder apreciar mejor el comportamiento en los tres ensayos. Así, las curvas obtenidas indican que en los pulsos en estado húmedo o saturado (sin flujo de agua) la capacidad de evacuación del calor es similar y, por

tanto, le temperatura a la que se consigue que la fibra estabilice es aproximadamente la misma. Sin embargo, cuando hay un flujo de agua constante fluyendo por el sustrato su capacidad de disipación térmica, como es de esperar, es mayor (aproximadamente $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$). También se observa que el último pulso térmico (P3, con el suelo en estado saturado pero sin flujo de agua) se llevó a cabo con una duración menor, para comprobar si dicha reducción temporal permitía alcanzar la estabilidad térmica; a la vista de lo reflejado en la Figura 9, las zonas de la fibra expuestas al aire no llegaron a alcanzar la estabilidad térmica, lo que permite ratificar que los tiempos adoptados en la metodología de ensayos es correcta y que pulsos térmicos más cortos no garantizarán unas medidas fiables para los objetivos del presente trabajo.

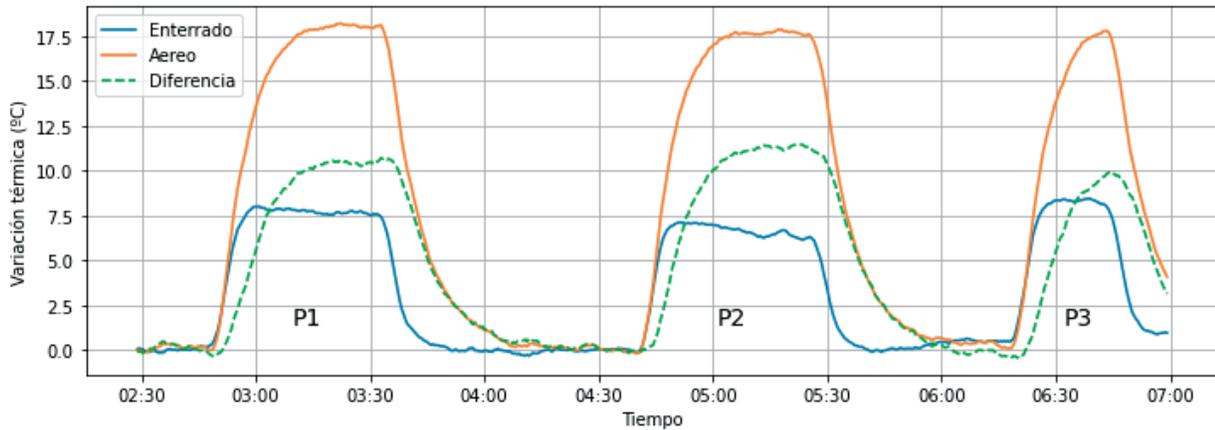


Figura 9 | Evolución temporal de los gradientes térmicos en dos puntos de la fibra, uno en la zona enterrada y otro fuera de la misma.

Finalmente, la Figura 10 muestra los resultados superpuestos de los tres pulsos térmicos en las condiciones P1, P2 y P3, para el punto de la fibra situado en el interior del sustrato. En esta imagen se muestra de forma más clara cómo en las condiciones de tierra humectada y saturada el gradiente térmico obtenido es muy similar, mientras que con flujo de agua constante dicho gradiente es inferior en valores de aproximadamente $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

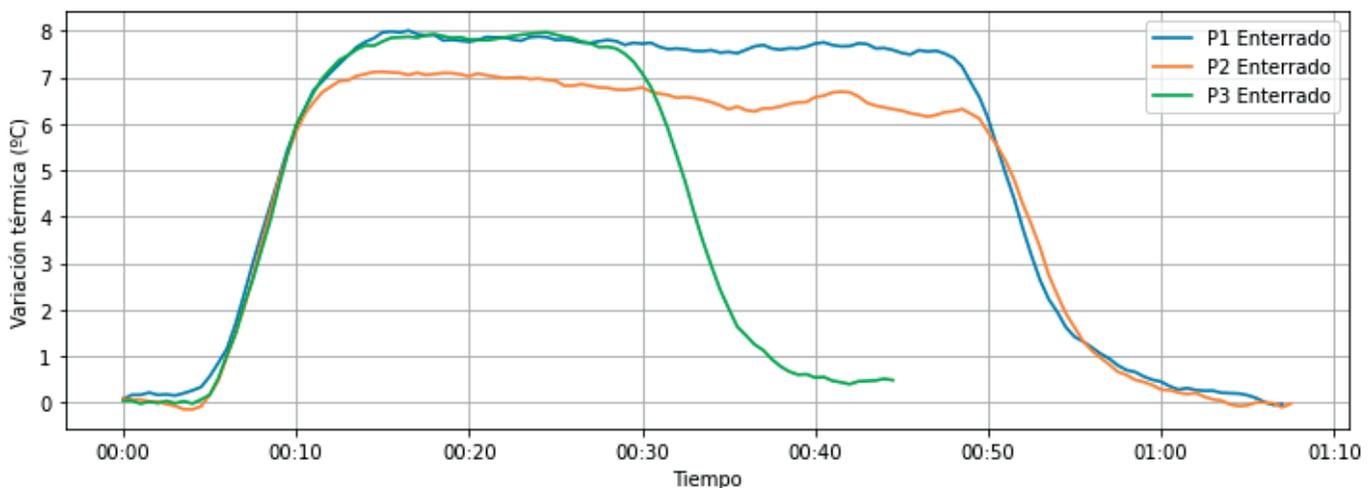


Figura 10 | Resultados de las medidas de los tres pulsos térmicos descritos superpuestos.

DISCUSIÓN

La monitorización de infraestructuras hidráulicas para la detección de agua circulante en el subsuelo mediante la aplicación de sistemas DTS de fibra óptica, ofrece la posibilidad tanto de localizar espacialmente los puntos donde se están produciendo fugas como de estimar las condiciones hidráulicas del subsuelo. Sin embargo, la aplicabilidad de estas técnicas necesita de un desarrollo metodológico adaptado a las condiciones concretas de cada tipología de obra hidráulica. Por ejemplo, existen metodologías de tipo pasivo, donde sólo se registran las variaciones de la temperatura medida por la fibra a lo largo del tiempo, y otras de tipo activo, donde se proporciona un pulso térmico que incrementa la temperatura de la fibra, registrándose en este caso el proceso de disipación térmica que se produce por la interacción con el entorno y cuya respuesta no será únicamente dependiente de las condiciones de temperatura existentes de manera natural en el subsuelo.

Bersan *et al.* (2018) presentan los resultados del estudio experimental para el desarrollo de un sistema de detección de procesos de filtración de agua y tubificación en diques fluviales, basado en sensores DTS pero como sistema pasivo. Para ello construyeron un dique, instalaron el sistema de monitorización y midieron la temperatura registrada en condiciones sin filtración y con filtración. Durante el estudio obtuvieron valores de variación de temperatura inferiores a 1 °C, observando un importante efecto de las condiciones térmicas previas del subsuelo según distintas zonas o niveles del dique fluvial.

Por su parte, Cola *et al.* (2021) llevaron a cabo la monitorización de otro dique fluvial para evaluar el comportamiento del agua en el cuerpo del dique en condiciones de avenida. Las medidas las realizaron a lo largo de todas las estaciones del año y, por ejemplo, durante una crecida en época otoñal, registraron un descenso de temperatura que fue desde los 10 °C antes de la crecida hasta que se estabilizó a 8.4 °C dos días después (con temperatura del aire en 11.4 °C). Para realizar estas medidas utilizaron un equipo interrogador DTS Oryx SR, preparado para 1 m de resolución espacial y 0.1 °C de resolución en temperatura para 2 km de distancia con un tiempo entre medidas de 30 segundos, pero siempre en condiciones de sistema pasivo, es decir, sin pulso térmico.

Estos dos ejemplos de sistemas de monitorización pasivos, sin aplicación de pulso térmico, tienen como ventajas que no requieren de un sistema de alimentación energética (y, por tanto, no exigen un consumo de energía), pero como inconvenientes principales presentan una importante influencia de la temperatura ambiental y de sus variaciones a lo largo del año en las medidas registradas, así como un rango de temperaturas muy reducido a partir del cual interpretar el comportamiento hidráulico del sistema. En estos dos ejemplos se ha observado cómo los gradientes térmicos registrados por la fibra no superaban los 1.5 °C, lo que dificulta la detección precisa de los procesos que se desea monitorizar.

En el presente trabajo se ha aplicado un sistema de tipo activo, en el cual se emite un pulso térmico que incrementa la temperatura de la fibra óptica y permite medir la evolución de la temperatura durante y tras la finalización del pulso térmico, en los distintos puntos a lo largo de la misma. Los resultados obtenidos han permitido comprobar que, con la potencia del sistema eléctrico empleado, se consigue generar gradientes térmicos superiores a 6 °C, lo cual permite analizar el comportamiento del sistema comparando los valores térmicos obtenidos simultáneamente en distintos puntos a lo largo de la fibra óptica (lo que ha permitido evaluar su estado seco, húmedo, saturado y con circulación de agua), y también la evolución térmica de cada punto concreto a lo largo del tiempo. En los valores absolutos de los gradientes térmicos registrados a lo largo de la fibra óptica influyen los procesos de disipación del calor transmitido mediante el pulso térmico, los cuales obedecen tanto a conducción térmica (dependiente a su vez de las condiciones de humedad del subsuelo) como de advección en el caso de que exista un flujo de agua que permita evacuar una mayor cantidad del calor provocado por el flujo térmico.

En una investigación previa se implantó un sistema similar de monitorización para la detección de fugas en dos presas en construcción (Muñoz *et al.*, 2016; Sánchez *et al.*, 2022), pero sin llevar a cabo una calibración inicial de los resultados en diferentes condiciones de humedad del subsuelo; así, las variaciones térmicas estacionales y las existentes de manera simultánea en diferentes zonas de las infraestructuras se mostraron suficientemente importantes como para interferir en una identificación precisa de las condiciones de humedad provocadas por una fuga. En el presente trabajo se ha adaptado el sistema de monitorización a las condiciones constructivas concretas de las balsas, y se ha desarrollado el conjunto de experiencias en laboratorio bajo diferentes condiciones para definir con precisión las diferencias térmicas que pueden obtenerse en una infraestructura de este tipo para, en una fase posterior de la investigación, aplicarlo a un prototipo real, actualmente en construcción, dentro del mismo proyecto de investigación. Los resultados obtenidos indican la viabilidad del sistema de detección de fugas en balsas mediante la tecnología DTS con aplicación de pulso térmico, mediante el protocolo seguido en la fase de realización de ensayos en laboratorio en lo

relativo a los tiempos potencia aplicada durante el pulso térmico. Además, el estudio y análisis de consumos del circuito eléctrico equivalente ha permitido anticipar posibles problemas a la hora de llevar a cabo las pruebas de laboratorio, resolviendo el problema añadiendo una resistencia que reduzca la corriente demandada de a la red eléctrica. Los resultados obtenidos en laboratorio servirán para definir las condiciones de aplicación a un caso real de una balsa monitorizada con fibra óptica, y permiten abordar dicha fase de implantación en un sistema a escala real con la garantía de que los sistemas activos (con pulso térmico) posibiliten la identificación de zonas con diferentes condiciones hidráulicas, facilitando por tanto la localización precisa de los puntos de pérdida en las balsas.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a partir del dispositivo de laboratorio han permitido verificar las condiciones de funcionamiento de este tipo de sistemas de monitorización para su implantación en balsas, con el objetivo de identificar y localizar las posibles fugas durante su vida útil. En general, las filtraciones a partir de infraestructuras hidráulicas, salvo en situaciones catastróficas que implican un fallo estructural grave, son procesos que inicialmente operan lentamente, por lo que su vigilancia necesita una monitorización continua para poder detectarlas con la mayor precisión y en un estadio lo más temprano posible. En este sentido, el sistema aquí desarrollado y calibrado permite, mediante la aplicación de un pulso térmico, generar un gradiente térmico lo suficientemente amplio como para interpretar con un elevado grado de precisión las diferencias de comportamiento térmico del entorno de la fibra óptica, resultantes de condiciones hidráulicas distintas en el subsuelo. Los gradientes registrados en los ensayos llevados a cabo en las diferentes condiciones de humedad han ofrecido suficiente contraste térmico como para permitir trasladar con garantías esta metodología a un modelo a escala real y, tras las correspondientes simulaciones de fugas en diferentes puntos del sustrato de la balsa, validar la técnica de monitorización. En la segunda fase de la investigación, ya sobre una balsa a escala real, se abordarán aspectos de interés aplicado como son la distribución geométrica más adecuada de la fibra por debajo de la lámina impermeable, o la respuesta del sistema de monitorización frente a diferentes magnitudes de flujo subterráneo.

Esta investigación contribuye de manera directa a la transición digital y ambiental del sector agropecuario, implementando sensorica innovadora, de bajo coste y alta resolución en un sector en el cual, todavía, la instrumentación y las tecnologías digitales avanzadas son poco empleadas. Además, en el caso concreto de las balsas de almacenamiento de purines, la detección temprana de fugas al medio supone un reto medioambiental para la conservación del buen estado de los medios receptores, especialmente del medio hidrogeológico.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido financiado con el Programa de Ayudas a las agrupaciones empresariales innovadoras en la convocatoria 2022b del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, con n° de expediente AEI-010500-2022b-320, dentro del consorcio formado por el Cluster para el Uso Eficiente del Agua (ZINNAE), Canteras de Ejea S.L, Ingeniería de Obras de Zaragoza S.L y Escuela Universitaria Politécnica de la Almunia. Los autores agradecen a la Fundación Tecnalía Research & Innovation por su apoyo en el presente proyecto.

REFERENCIAS

Bersan, S., Koelewijn, A.R., Simonini, P. 2018. Effectiveness of distributed temperatura measurements for early detection of piping in river embankments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 1491-1508. <https://doi.org/10.5194/hess-22-1491-2018>

BREF. 2017. Decisión de ejecución (UE) 2017/302 de la Comisión de 15 de febrero de 2017, por la que se establecen las conclusiones sobre las mejores técnicas disponibles (MTD) en el marco de la Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo respecto a la cría intensiva de aves de corral o de cerdos. DOUE, L 43/231 (publ. 17/02/2017).

- Čejka, F., Beneš, V., Glac, F., Boukalova, Z. 2018. Monitoring of seepages in earthen dams and levees. *International Journal of Environmental Impacts: Management, Mitigation and Recovery*, 1, 267-278. <https://doi.org/10.2495/EI-V1-N3-267-278>
- Cola, S., Girardi, V., Simonini, P., Schenato, L., De Polo, F. 2021. An optical fiber-based monitoring system to study the seepage flow below the landside toe of a river levee. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11, 691-705. <https://doi.org/10.1007/s13349-021-00475-y>
- Ghafoori, Y., Vidmar, A., Riha, J., Kryzanowski, A. 2020. A review of measurement calibration and interpretation for seepage monitoring by optical fiber distributed temperature sensors. *Sensors*, 20, 5696. <https://doi.org/10.3390/s20195696>
- Gil-Rodríguez, M., Rodríguez-Sinobas, L., Benítez-Buelga, J., Sánchez-Calvo, R. 2013. Application of Active Heat Pulse method with fiber optic temperature sensing for estimation of wetting bulbs and water distribution in drip emitters. *Agricultural Water Management*, 120, 72-78. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.10.012>
- Instituto Nacional de Estadística. 2020. Censo Agrario 2020. <https://www.ine.es/censoagrario2020/presentacion/index.htm>
- Kappelmeyer, O. 1957. The use of near surface temperature measurements for discovering anomalies due to causes at depths. *Geophysical Prospecting*, 5, 239-258.
- Lambe, T.W., Whitman, R.V. 1969. *Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York. 553 p. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1957.tb01431.x>
- Leng, Y.B., Zhu, Y.P., Zhou, Y. 2007. Monitoring technology for embankment dam safety based on distributed optical fiber sensing and its prospect. *Progress in Geophysics*, 22(3), 1001-1005.
- Muñoz O., Gómez R., Russo B., Sánchez J.C. 2016. Sistema de detección de fugas en tiempo real en presas de materiales sueltos mediante sensores distribuidos en fibra óptica. *Revista de Ingeniería del Agua*, 20(2), 103-114. <https://doi.org/10.4995/ia.2016.4450>
- Sánchez, J.C., Muñoz, O., Russo, B., Acero, A., Paindelli, A. 2022. Distributed temperatura sensors system. Field test son earth dam. *DYNA*. <https://doi.org/10.6036/10418>
- Schenato, L. 2017. A review of distributed fibre optic sensors for geo-hydrological applications. *Applied Sciences*, 7(9), 896. <https://doi.org/10.3390/app7090896>
- Su, H.Z., Cui, S.S., Wen, Z.P., Xie, W. 2019. Experimental study on distributed optical fiber heated-based seepage behavior identification in hydraulic engineering. *Heat and Mass Transfer*, 55, 421-432. <https://doi.org/10.1007/s00231-018-2431-2>
- Ukil, A., Braendle, H., Krippner, P. 2012. Distributed temperature sensing: review of technology and applications. *IEEE Sensors Journal*, 12(5), 885-892. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2162060>
- Xiao, H.L., Bao, H., Wang, C.Y., Zhou, H., Liu, L. 2016. Discussion on mechanism of distributed fiber optical leakage monitoring technology based on temperature measurement. *Rock and Soil Mechanics*, 10, 2794-2798.
- Yao, J.C., Shi, B., Liu, J., Sun, M.Y., Fang, K., Yao, J., Gu, K., Zhang, W., Zhang, J.W. 2022. Improvement and Performance Evaluation of a Dual-Probe Heat Pulse Distributed Temperature Sensing Method Used for Soil Moisture Estimation. *Sensors*, 22, 7592. <https://doi.org/10.3390/s22197592>