

# MONTSE: MONitorización de las Temperaturas de SEdimentos para evaluar su acumulación en sistemas de drenaje urbano

Manuel Regueiro-Picallo<sup>a</sup>, Antonio Moreno-Rodenas<sup>b</sup>, François Clemens-Meyer<sup>b,c</sup> y Jörg Rieckermann<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Universidade da Coruña, Water and Environmental Engineering Research Team (GEAMA), A Coruña, Spain. [manuel.regueiro1@udc.es](mailto:manuel.regueiro1@udc.es).

<sup>b</sup>Deltares, Hydraulic Engineering Department, Delft, the Netherlands. [Antonio.MorenoRodenas@deltares.nl](mailto:Antonio.MorenoRodenas@deltares.nl), [Francois@SkillsInMotion.nl](mailto:Francois@SkillsInMotion.nl).

<sup>c</sup>Norwegian University of Science and Technology, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Trondheim, Norway.

<sup>d</sup>Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, CH-8600 Dübendorf, Switzerland.

[joerg.rieckermann@eawag.ch](mailto:joerg.rieckermann@eawag.ch).

Línea temática | Agua y ciudad.

---

## INTRODUCCIÓN

Los sedimentos presentes en los sistemas de drenaje urbano son un factor importante dentro de las operaciones de mantenimiento y limpieza. A pesar de que se invierte una cantidad significativa en estas tareas, aún no existe un consenso claro sobre, por ejemplo, las labores de inspección de los sistemas de alcantarillado (Ertl et al., 2022). Además, las campañas de control del transporte de sedimentos en continuo están limitadas por el elevado coste de instalación y mantenimiento de los equipos de monitorización. Trabajos anteriores se han utilizado ha campañas experimentales puntuales, utilizando sensores acústicos (Lepot et al., 2017) e imágenes (Oms et al., 2003; Shahsavari et al. 2017). Además, es importante tener en cuenta que la monitorización de estos sistemas también se ve limitada por condiciones adversas, como la falta de cobertura en las infraestructuras subterráneas (Bertrand-Krajewski et al., 2021).

En este trabajo, se presenta un sistema y una metodología para la monitorización de sedimentos en sistemas de drenaje urbano a partir del uso de sensores de temperatura. Para ello, se han estudiado los procesos de transferencia de calor entre el fluido (agua residual o escorrentía) y el lecho de sedimentos con el objetivo de determinar su espesor. Esta idea se fundamenta en que los gradientes de temperatura en el fluido se atenúan a través de la capa de sedimentos mediante un proceso de conducción. Cuanto mayor sea la capa de sedimentos, mayor será la atenuación de la temperatura en el fondo del sedimento (Sebok et al., 2017). Por lo tanto, es necesario medir la diferencia de temperatura entre la capa de fluido y el fondo del sedimento para determinar su espesor. Asimismo, es necesario determinar las propiedades térmicas y la pérdida de calor a través de los contornos. Estudios previos han demostrado que las condiciones hidrodinámicas apenas influyen en el proceso de transferencia de calor en la capa de sedimento (Regueiro-Picallo et al., 2022). Por consiguiente, las campañas de monitorización pueden limitarse al uso de sensores de temperatura, evitando la necesidad de medir variables hidrodinámicas (por ejemplo, velocidad y calado).

---

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Procesos de transferencia de calor en sistemas de drenaje urbano

Este trabajo se ha centrado en analizar los procesos de transferencia de calor en tuberías de saneamiento unitario e imbornales. Aunque se trata del mismo principio físico, las oscilaciones de temperatura y las características geométricas son diferentes en cada sistema, lo que requiere el desarrollo de métodos desde perspectivas distintas. Es necesario que la transferencia de calor derivada de las oscilaciones de temperatura sea significativa para poder medir la acumulación de sedimentos.

Los sistemas de saneamiento son susceptibles de sufrir oscilaciones diarias de caudal y temperatura. Es habitual observar patrones de temperatura en tuberías de saneamiento unitario en condiciones de tiempo seco, caracterizados por un aumento de la temperatura en las primeras horas del día, seguido de un ligero descenso al mediodía, un repunte de la temperatura por la tarde y un descenso significativo por la noche. Este patrón se repite diariamente en condiciones de tiempo seco, aunque presenta variaciones espaciales y estacionales. La periodicidad de los patrones de temperatura permite analizarlos como series armónicas. Estudios previos realizados en cauces fluviales han demostrado que las diferencias en las amplitudes y fases de las series de temperatura en un fluido y en el lecho sedimentario se pueden relacionar con su espesor (Sebok et al., 2017). La relación entre el primer armónico y el espesor de sedimentos en sistemas de saneamiento unitarios se analizó en Regueiro-Picallo et al. (2023).

Los procesos de transferencia de calor en imbornales son significativos cuando se producen precipitaciones. La temperatura del agua de escorrentía que entra en los imbornales suele ser diferente de la temperatura del agua estancada en su interior, lo que crea un gradiente de temperatura que se transfiere a la capa de sedimentos acumulados por difusión. A diferencia de las tuberías de saneamiento, este fenómeno no sigue un patrón cíclico, por lo que requiere analizar cada evento de lluvia de forma independiente.

## Sistema MONTSE

El sistema desarrollado para medir espesores de sedimentos a partir de las temperaturas en sistemas de drenaje urbano se ha apodado MONTSE: MONitoring Temperatures in SEDiments. Este sistema se compone de varios sensores de temperatura y un cartucho calefactor, conectados a un microcontrolador que mide y almacena los datos (Figura 1a). Se pueden diferenciar dos tipos de medidas de temperatura en este sistema: activas y pasivas. Las medidas activas de temperatura consisten en pulsos de calor introducidos en el lecho de sedimentos, a partir de los cuales se obtienen las propiedades térmicas. Para ello, se utiliza el cartucho calefactor, cerca del cual se coloca un sensor de temperatura. Este sistema activo también se denomina sistema Dual-Probe Heat-Pulse (DPHP) y su uso es común para medir las propiedades térmicas de suelos (ejemplo, He et al., 2018). Por otro lado, las medidas pasivas se corresponden a las lecturas de temperatura que capturan los procesos de transferencia que ocurren en los sistemas de drenaje urbano. Actualmente, el sistema MONTSE cuenta con dos versiones. La versión inicial se ha desarrollado para su uso en laboratorio y cuenta con una fuente de alimentación continua, mientras que la segunda se ha desarrollado para campañas en campo y cuenta con una batería (Figura 1b).

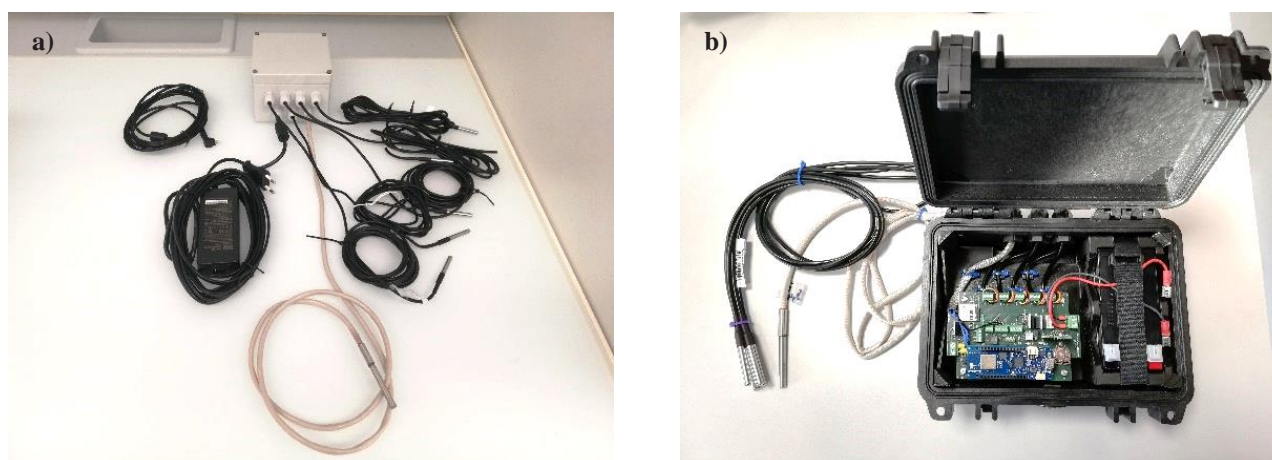
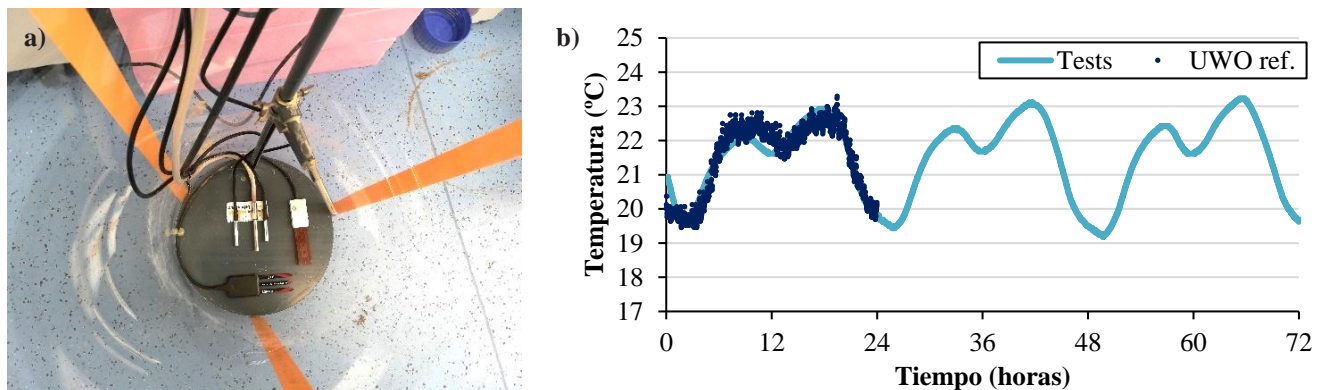


Figura 1 | Sistema MONTSE para su uso en campañas experimentales en laboratorio (a) y campo (b).

## Campañas experimentales

A continuación, se presentan dos campañas experimentales llevadas a cabo para evaluar la eficiencia de este sistema. La primera campaña experimental se llevó a cabo en las instalaciones de Eawag (Dübendorf, Suiza), en la que se desarrolló un modelo de laboratorio para reproducir los procesos de transferencia en tuberías de saneamiento unitario. En esta campaña se analizaron 4 espesores (entre 2 y 16 cm) de 6 muestras con diferentes contenidos de materia orgánica. Una de las muestras ensayada consistía en arena lavada con una granulometría entre 315 y 500  $\mu\text{m}$ . El resto de las muestras de sedimentos se recogieron en el sistema de saneamiento y drenaje de Zurich (Suiza): dos muestras en imbornales, dos muestras en tuberías de saneamiento unitario y una muestra en un tanque de tormentas.

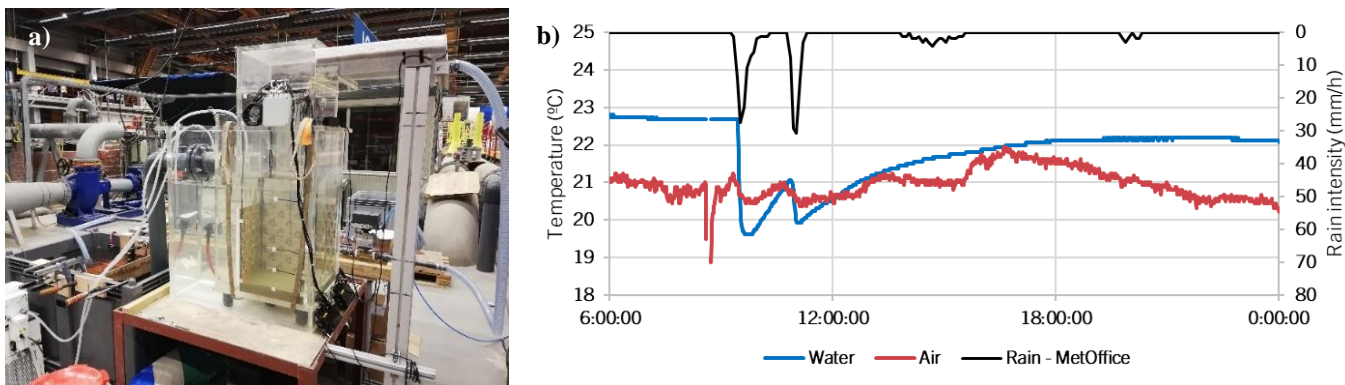
Para cada ensayo, se vertió una capa de sedimentos sumergida en una capa de agua dentro de un cilindro de metacrilato con fondo de PVC (Figura 2a). Se utilizó un circuito cerrado de temperatura para reproducir los patrones diarios de temperatura en tuberías de alcantarillado. Como referencia se utilizaron datos del Observatorio Urbano del Agua (UWO) operado por el Eawag (Blumensaat et al., 2023) (Figura 2b). Se colocaron sensores de temperatura en el fondo, en la interfaz sedimento-agua y fuera del modelo. En condiciones reales de flujo por tuberías, podemos suponer que la temperatura es constante en la columna de agua hasta la interfaz con el sedimento. Además, se instalaron sensores comerciales en el fondo del modelo para medir el contenido volumétrico de agua y las propiedades térmicas de los sedimentos. Estas mediciones se compararon con las obtenidas con el sistema DPHP activo. La duración de cada ensayo fue de 72 horas.



**Figura 2** | Modelo físico en las instalaciones de Eawag para simular los procesos de transferencia de calor en tuberías de saneamiento (a) y comparación entre el patrón diario de temperaturas en aguas residuales observado en el UWO durante condiciones de tiempo seco y el patrón diario definido en la capa de agua para la campaña experimental (b).

La segunda campaña experimental se llevó a cabo en las instalaciones de Deltares (Delft, Países Bajos). Se utilizó un modelo a escala 1:1 (Rietveld, et al. 2020) para reproducir los procesos de transferencia en imbornales (Figura 3a). La geometría del modelo de imbornal tiene una sección cuadrada de 35 cm x 35 cm, típica de las calles holandesas. Se ensayaron 5 espesores de sedimento (entre 5 y 25 cm), 3 tipos de sedimentos, 2 gradientes de temperatura ( $\Delta T = -3^\circ\text{C}$  y  $-5,5^\circ\text{C}$ ), y 3 hidrogramas de entrada. Los sedimentos utilizados consistieron en una muestra de arena lavada con granulometría entre 400 y 800  $\mu\text{m}$ , una muestra orgánica recogida de imbornales, y una muestra compuesta a partir de la mezcla de las dos anteriores.

Se utilizaron dos sistemas de control de temperatura para simular el gradiente de temperatura entre el agua de escorrentía y la capa de agua estancada en los imbornales. Para ello, se utilizaron como referencia datos de campo (Figura 3b). Se colocaron sensores de temperatura en el fondo y en las paredes del imbornal cada 5 cm hasta una altura de 30 cm. Además, se instalaron sensores en los sistemas de control de la temperatura y en la entrada del imbornal. La duración de cada ensayo varió entre 3 y 6 horas para  $\Delta T = -3^\circ\text{C}$  y  $-5,5^\circ\text{C}$ , respectivamente.

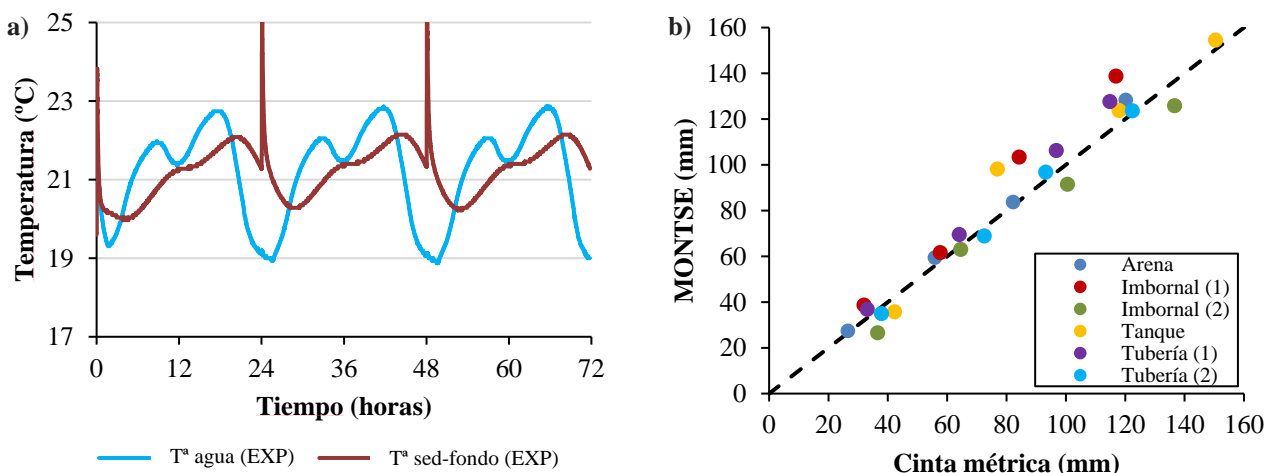


**Figura 3** | Modelo físico en las instalaciones de Deltares para simular los procesos de transferencia de calor en imbornales (a) y medidas de lluvia y temperatura en imbornales utilizadas como referencia para establecer los gradientes de temperatura en la campaña experimental de laboratorio (b).

## RESULTADOS

La Figura 4a muestra la atenuación y el desfase de las temperaturas en el agua (interfaz agua-sedimento) y en el fondo del lecho de sedimentos para un espesor de 8.5 cm. Los pulsos de temperatura en el lecho representan la respuesta al sistema de calor activo DPHP. Analizando estos pulsos se pueden obtener las propiedades térmicas del sedimento (He et al., 2018). Como resultado de la campaña de ensayos, se han obtenido valores de conductividad térmica ( $k_t$ ) y difusividad ( $k_e$ ) comprendidos entre  $[0.60 - 1.30]$  W/m $^{\circ}$ C y  $[0.18 - 0.60] \times 10^{-6}$  m $^2$ /s, respectivamente, para muestras de sedimentos con contenido de materia orgánica entre  $[0 - 22]\%$ .

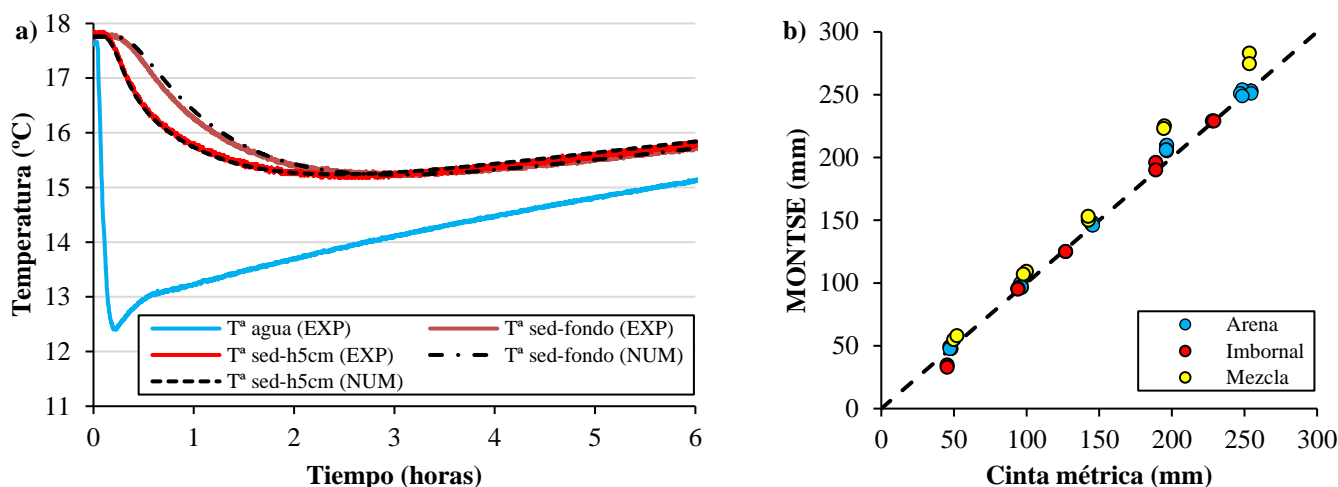
Una vez medidas las propiedades térmicas de cada muestra, se pudo estimar el espesor del sedimento a partir de la relación de amplitudes y diferencias en los cambios de fase entre las series de temperatura en el agua y el fondo del lecho sedimentario (ejemplo, Figura 4a). Para ello, se utilizó un modelo de datos desarrollado a partir de un modelo 1D de transferencia de calor por difusión para generar múltiples escenarios a partir de las series de temperatura del agua y las propiedades térmicas del sedimento (Regueiro-Picallo et al., 2023). Se han obtenido errores inferiores a 2.2 cm a partir de la comparación de los resultados del modelo de datos con medidas del espesor de la capa de sedimentos realizadas con una cinta métrica (Figura 4b). Los errores medios observados se estimaron en 0.7 cm.



**Figura 4** | Medidas de temperatura en la capa de agua y en el fondo de sedimentos para un espesor de sedimentos de 8.5 cm (a), y comparación entre las medidas realizadas con el sistema MONTSE basado en temperaturas y las realizadas con una cinta métrica de los espesores de sedimentos acumulados en el modelo físico de laboratorio (b).

La Figura 5a muestra la atenuación y el desfase de las temperaturas en el agua (interfaz agua-sedimento) y en el lecho de sedimentos (fondo y a una altura de 5 cm) para un espesor de 10 cm dentro del imbornal. El flujo de agua introduce un pulso de temperatura que enfría la capa de agua almacenada en el imbornal, transmitiéndose por difusión a través de la capa de sedimentos. Al igual que la campaña experimental anterior, se han caracterizado las propiedades térmicas de las muestras de sedimentos ensayadas:  $k_t = [0.81 - 2.17] \text{ W/m}^\circ\text{C}$  y  $k_e = [0.24 - 0.72] \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .

A diferencia del caso de estudio anterior, se ha utilizado un modelo numérico 2D de transferencia de calor por difusión para obtener el espesor de sedimentos acumulados debido principalmente a la posición de los sensores de temperatura próximos a los contornos (paredes). La estimación del espesor de sedimentos se realizó calculando el valor que proporcionaba el mejor ajuste entre las series de temperatura experimentales y simuladas en el lecho de sedimentos (ejemplo, Figura 5a). De forma similar a la campaña anterior, las medidas del espesor de sedimentos obtenidas con el sistema MONTSE se compararon con las registradas con sistemas de medición graduados. Los errores máximos observados fueron menores a 3 cm y los errores medios se estimaron en 0.6 cm.



**Figura 5** | Medidas de temperatura experimentales y simuladas en la capa de agua y de sedimentos: fondo y pared a una altura de 5 cm (a), y comparación entre las medidas realizadas con el sistema MONTSE basado en temperaturas y las realizadas con una cinta métrica de los espesores de sedimentos acumulados en el imbornal (b).

## DISCUSIÓN

El sistema MONTSE fue ideado para su uso en sistemas de drenaje urbano. La parte correspondiente al sistema DPHP para la medida de las propiedades térmicas de sedimentos se ha diseñado para resistir daños potenciales por la interacción con partículas sólidas en condiciones de flujo turbulento. Estudios previos mostraron la viabilidad del uso de los sensores de temperatura seleccionados (DS18B20) en tuberías de saneamiento unitario (Blumensaat et al., 2023). El cartucho calefactor se ha construido con dimensiones similares a las de los sensores de temperatura para evitar problemas de taponamientos (longitud: 7.2 cm, diámetro: 0.6 cm). La instalación en tuberías de saneamiento se puede realizar utilizando un soporte auxiliar que permita situar los sensores en la posición deseada; principalmente en el fondo de la tubería y en una zona del contorno que esté sumergida (capa de agua residual). En caso de que la acumulación de sedimentos en tuberías de saneamiento sea superior a 10 cm, por ejemplo, en tuberías con diámetros mayores a 400 mm, se sugiere la instalación de sensores adicionales en la misma sección. En condiciones con elevada acumulación de sedimentos, existirá una gran atenuación de la serie de temperaturas en el fondo con respecto al patrón de temperaturas en la capa de agua residual, lo que imposibilitaría estimar el espesor de sedimentos.

La instalación de sensores adicionales en la misma sección permite tener una mayor discretización vertical de las temperaturas. Esta solución se adoptó para imbornales, instalando sensores cada 5 cm. De esta forma, es posible tener una estimación del espesor de sedimentos con una precisión, como mínimo, igual a la separación entre sensores. Cuando se produce



un episodio de lluvia, los sensores situados en la capa de agua tienden a medir valores similares de temperatura ya que la entrada del flujo de escorrentía acelera el proceso de mezcla por convección. Sin embargo, los sensores situados por debajo de la interfaz agua-sedimento presentan una respuesta más lenta debido a la transferencia de calor por difusión a través de la capa de sedimento. Por lo tanto, sería posible saber la posición de la interfaz agua-sedimento y, en consecuencia, el espesor de sedimentos con una precisión igual a la separación entre sensores con una comparación cualitativa de las series de temperatura durante los episodios de lluvia. Para el caso singular en el que quiera establecer un umbral de acumulación de sedimentos para iniciar labores de limpieza en imbornales, sería suficiente con instalar dos sensores de temperatura, uno a la altura del umbral y otro por encima. En el momento en el que las señales de temperatura durante episodios de lluvia difieran, significaría que el espesor de sedimentos se encuentra por encima del umbral para efectuar labores de limpieza. Esta estrategia se podría replicar en otros sistemas de drenaje susceptibles a la acumulación de sedimentos como, por ejemplo, colectores, decantadores, trampas para sedimentos, etc.

El objetivo de este trabajo fue optimizar el uso y la distribución de los sensores de temperatura para poder estimar el espesor de sedimentos con una mayor precisión a la establecida por la separación vertical entre sensores. Para ello, fue necesario apoyarse en modelos desarrollados a partir de la ecuación de transferencia de calor por difusión en la capa de sedimentos. Como resultado, se han obtenido errores medios menores a 1 cm. Aunque para ejecutar labores de limpieza en sistemas de drenaje urbano pueda ser suficiente una precisión entre 5 y 10 cm o simplemente la definición de un umbral comentada en el párrafo anterior, contar con un sistema con una precisión menor a 1 cm podría utilizarse para mejorar los modelos de predicción de acumulación, erosión y transporte de sedimentos. De esta forma se podrían diseñar estrategias de limpieza y mantenimiento de los sistemas de drenaje urbano para minimizar las consecuencias de los procesos relacionados con la acumulación de sedimentos, como el riesgo de inundaciones y los desbordamientos de sistemas unitarios.

---

## CONCLUSIONES

La metodología de medición de la acumulación de sedimentos basada en una combinación de medidas activas y pasivas de la temperatura representa una alternativa para controlar el espesor de sedimentos y los procesos relacionados en sistemas de drenaje urbano. Se realizaron pruebas a escala de laboratorio reproduciendo las condiciones de transferencia de calor en tuberías de saneamiento unitario e imbornales. En estas condiciones, se pudo estimar el espesor de los sedimentos con errores medios inferiores a 1 cm. Esta metodología se desarrolló utilizando sensores de temperatura de bajo coste, lo que también supone una ventaja competitiva. Actualmente se están realizando nuevas medidas en sistemas de drenaje urbano reales para comprobar la viabilidad de los métodos presentados en este estudio.

---

## AGRADECIMIENTOS

El trabajo de Manuel Regueiro-Picallo está financiado por el programa de contratos postdoctorales de la Xunta de Galicia. Este trabajo incluye los resultados de un acceso transnacional y una actividad de investigación conjunta financiados por la UE bajo el programa Horizon 2020 INFRAIA (proyecto Co-UDlabs. GA No.101008626). Los autores agradecen al grupo de trabajo del Acceso Transnacional HALL-Eawag por su apoyo en la campaña experimental en Eawag, y al municipio de Rotterdam y a la empresa Van der Valk+De Groot por su apoyo en la campaña de campo. También agradecen a Christian Ebi, Peer Wohlwend y Florian Züger del Sensorlab de Eawag por el diseño, desarrollo e implementación del prototipo.

---

## REFERENCIAS

Bertrand-Krajewski, J.L., Clemens-Meyer, F., Lepot, M. (2021). Metrology in urban drainage and stormwater management: Plug and pray. IWA Publishing. <https://www.iwapublishing.com/books/9781789060102/metrology-urban-drainage-and-stormwater-management-plug-and-pray>

- Blumensaat, F., Bloem, S., Ebi, C., Disch, A., Förster, C., Maurer, M. (2023, in prep.). The Urban Water Observatory - Long-term monitoring of urban water resources dynamics in very high spatiotemporal resolution using low-power sensor and data communication techniques. <https://uwo-opendata.eawag.ch/>.
- Ertl, T.W., Plihal, H., Kerres, K. (2022). New approach for condition-based sewer inspection combined with demand-based sewer cleaning assisted through innovative tools. *In proceedings of the 10th Sewer Processes and Networks*, Graz, Austria.
- He, H., Dyck, M. F., Horton, R., Ren, T., Bristow, K. L., Lv, J., Si, B. (2018). Development and application of the heat pulse method for soil physical measurements. *Reviews of Geophysics*, 56(4), 567-620.
- Lepot, M., Pouzol, T., Aldea Borrueal, X., Suner, D., Bertrand-Krajewski, J. L. (2017). Measurement of sewer sediments with acoustic technology: from laboratory to field experiments. *Urban Water Journal*, 14(4), 369-377.
- Oms, C., Gromaire, M. C., Chebbo, G. (2003). In situ observation of the water-sediment interface in combined sewers, using endoscopy. *Water Science and Technology*, 47(4), 11-18.
- Regueiro-Picallo, M., Figueroa, A., Rieckermann, J. (2022). Improving sediment monitoring strategies based on analysing heat transfer processes in sewer pipes. *In proceedings of the 10th International Conference on Sewer Processes and Networks*, Graz, Austria.
- Regueiro-Picallo, M., Anta, J., Naves, A., Figueroa, A., Rieckermann, J. (2023). Towards urban drainage sediment accumulation monitoring using temperature sensors. *Environmental Science: Water Research & Tech.*, approved for publication.
- Rietveld, M., Clemens, F., Langeveld, J. (2020). Solids dynamics in gully pots. *Urban Water Journal*, 17(7), 669-680.
- Sebok, E., Engesgaard, P., Duque, C. (2017). Long-term monitoring of streambed sedimentation and scour in a dynamic stream based on streambed temperature time series. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(9), 1-15.
- Shahsavari, G., Arnaud-Fassetta, G., Campisano, A. (2017). A field experiment to evaluate the cleaning performance of sewer flushing on non-uniform sediment deposits. *Water Research*, 118, 59-69.