

THE POTENTIAL USE OF FIBER OPTIC DISTRIBUTED TEMPERATURE SENSING TO ANALYZE WATER POLLUTANT COMPOSITION

Zubelzu Mínguez, Sergio ¹; Rodríguez, Leonor ²; Sánchez, Raúl ²; Juana, Luis ²

¹ Universidad Complutense de Madrid, ² Universidad Politécnica de Madrid

Using the fiber optic through DTS techniques allows characterizing temperature around the fiber optic line. In this paper the alternatives to use this methodology to study pollutants in the water are analyzed. The different thermal behavior of the water according to its composition can be analyzed through heat convection or conduction processes. The theoretic results show that the aforementioned methodology is capable of measuring water pollutant composition according to some restrictions provided that the noise of distributed temperature measurements is controlled.

Keywords: fiber optic; water pollutant; convection; conduction

POTENCIAL EN EL USO DE FIBRA ÓPTICA PARA CARACTERIZAR CONTAMINANTES EN EL AGUA MEDIANTE LA TÉCNICA DISTRIBUTED TEMPERATURE SENSING (DTS)

El uso de fibra óptica mediante las técnicas de DTS permite su uso como sensor para la caracterización de las temperaturas en el entorno circundante al cable de fibra óptica. En el presente trabajo se analizan las posibilidades y condiciones de aplicación de dicha herramienta para la caracterización contaminantes en el agua. Para ello se recurre a las diferentes características de propagación del calor mediante procesos de conducción o convección en función de la composición del agua. Los resultados muestran la capacidad de la técnica para servir al objetivo perseguido siempre y cuando se controle el ruido inherente al sistema de medida.

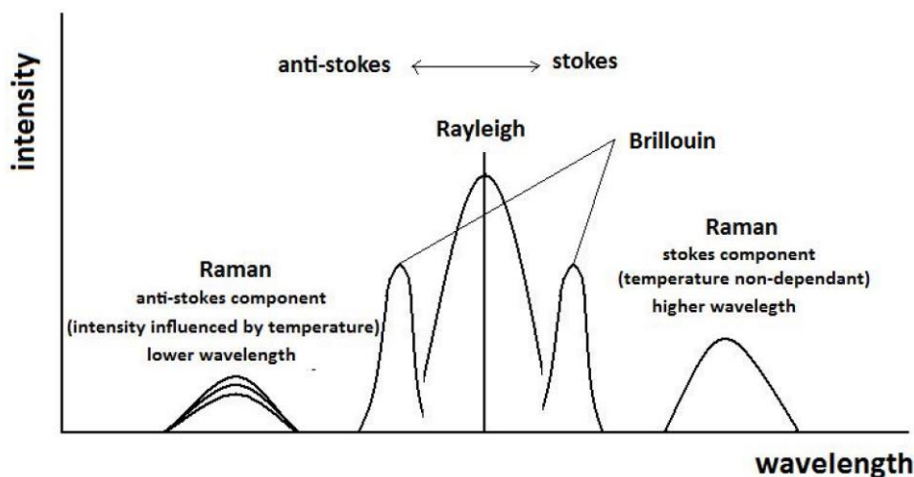
Palabras clave: fibra óptica; contaminantes del agua; convección; conducción

1. Introducción

En los últimos años se han desarrollado diferentes técnicas para el monitoreo y control de variables ambientales basadas en el uso de la fibra óptica como sensor. Son varios los desarrollos en esta línea y entre ellos cabe destacar los trabajos de Selker et al. (2006a), Selker et al., (2006b), Lowry et al., (2007), Vercauteren et al., (2011), Briggs et al., (2012), Sayde et al (2014), Benitez-Buelga et al., 2014 o Benitez-Buelga et al., 2016. Se trata en su mayor parte de aplicaciones que hacen uso de sensores distribuidos de temperatura (Distributed Temperature Sensing –DTS–) que permiten la medida de temperatura a lo largo de un cable de fibra óptica.

El principio en el que se basa estas aplicaciones es en la diferente reflexión de un pulso luminoso, procedente del rayo laser alojado en la unidad “Distribute Temperature Sensing” DTS, en diferentes frecuencias dentro del espectro Raman, tales frecuencias se denominan stoke y antistoke. La figura 1 muestra el esquema de la onda principal y las reflejadas en los entornos Raman y Brillouin (para una descripción más detallado de los conceptos físicos y su relación con los DTS, el lector puede consultar Smolen y van der Spek, 2003).

Figura 1. Esquema onda principal y ondas reflejadas.



Las ondas antistoke son sensibles a la temperatura del entorno, mientras que las stoke no lo son por lo que, la temperatura en un punto x a lo largo de un cable de fibra óptica puede obtenerse a partir de la siguiente expresión (ecuación 1).

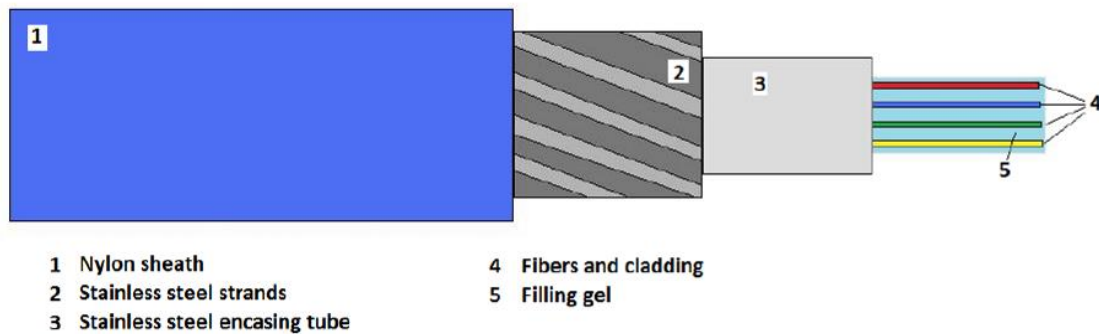
$$T_x = \gamma \cdot [\ln(I_s/I_{as}) + c - (x\Delta\alpha)]^{-1} \quad (1)$$

Donde: T_x es la temperatura en un punto x a lo largo del cable, γ , c y $\Delta\alpha$ son constantes que dependen de las características de la instalación e I_s e I_{as} son las intensidades de la atenuación de las ondas stoke y antistoke, respectivamente. Las características del cable de fibra óptica (índice de refracción) y las características del laser (frecuencia) y la capacidad de almacenamiento del DTS van a afectar a la resolución espacial y temporal de la temperatura.

En las aplicaciones que requieren mayor precisión, se utiliza el procedimiento de calentamiento activo (Actively Heated Fiber Optic –AHFO–) que consiste en aplicar pulsos de calor a la fibra durante un cierto tiempo y medir el comportamiento del conjunto en las fases de calentamiento y enfriamiento. En este sentido, se han desarrollado diferentes

aplicaciones y técnicas de medida como por ejemplo la T_{cum} (Sayde et al., 2010; Gil-Rodríguez et al., 2013) o la ΔT_8 (Sourbeer and Loheide, 2015). Este procedimiento requiere una configuración especial de cable de fibra óptica que permita dicho calentamiento. En estos casos los cables tienen una camisa metálica envolvente a la que se aplica una potencia calorífica que produce un calentamiento y que va a depender de la resistencia eléctrica del material conductor. La figura 2 muestra el esquema del cable en las aplicaciones con calentamiento de la fibra.

Figura 2. Esquema del cable de fibra empleado para el calentamiento.



En este sentido, en el presente trabajo se estudia el potencial de la técnica AHFO junto con el DTS para identificar diferentes fluidos en los que se sumerge la fibra. La viabilidad de esta aplicación abriría las puertas al desarrollo de una metodología que identificaría la presencia de diferentes fluidos en el tiempo y en el espacio de forma continua, ya que los sistemas actuales permiten obtener una medida de temperatura cada segundo y cada 0,126 m de longitud y con una extensión del cable que puede alcanzar los 10 km.

2. Materiales y Métodos

2.1. Metodología

En condiciones de régimen hidrostático, el proceso de transmisión de calor a lo largo del cable de fibra calentada, mediante un pulso calorífico, sumergida en el seno de un fluido puede modelizarse mediante la expresión de transmisión de calor por convección siguiente (ecuación 2).

$$q = h (T_s - T_f) \quad (2)$$

El calor aportado por unidad de superficie (q) es un dato conocido al tratarse de una variable de diseño condicionada por la necesidad de alcanzar el régimen estacionario. La temperatura del fluido en un punto alejado de la fuente de calor (T_f) es conocida dado que se mide (bien con un sensor de temperatura ajeno al propio DTS, bien con los sensores Pt que incluye el equipo o también mediante la medida de la propia fibra óptica en el período previo a la aplicación del pulso de calor). Por su parte, la temperatura del elemento calentado (T_s) es la temperatura que mide el DTS en la propia fibra. De este modo, la incógnita del problema resulta ser el coeficiente convectivo h que mide la capacidad del fluido para absorber el calor cediendo por el cable de fibra óptica sumergido en él.

El valor de h permitiría a priori caracterizar el fluido, o su composición. Sin embargo, en la práctica, este coeficiente es sensible a los efectos de otras variables diferentes a las características del fluido por lo que el problema debe acotarse todavía más.

Lo primero que se debe concretar es el carácter natural o forzado del proceso de convección en función del posible movimiento del fluido. Una vez fijado, la determinación de h puede hacerse mediante números adimensionales bajo la hipótesis de que en laboratorio puede garantizarse la existencia de condiciones convectivas naturales o forzadas.

Así, las expresiones que permiten el cálculo teórico del coeficiente de convección para condiciones de convección natural, forzada en régimen laminar y forzada en régimen turbulento son las que se expresan en las ecuaciones 3, 4 y 5, respetivamente.

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{\left[1 + (0.559/Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \rightarrow \forall Ra \leq 10^{12} \quad (3)$$

$$Nu_x = 0.332 Re^{0.5} Pr^{1/3} \rightarrow \forall Pr < 0.6 \quad (4)$$

$$Nu_x = 0.0296 Re^{0.8} Pr^{1/3} \rightarrow \forall 0.6 < Pr < 60 \quad (5)$$

Donde: Nu , Pr , Re y Ra son los números adimensionales de Nusselt, Prandtl, Reynolds y Rayleigh. Este último queda definido a partir de los de Grashof (Gr) y Prandtl. Las ecuaciones 6 a 9 muestran cómo se determinan.

$$Nu = \frac{hD}{k}; Nu_x = \frac{h_x x}{k} \quad (6)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (7)$$

$$Re = \frac{ux}{\nu} \quad (8)$$

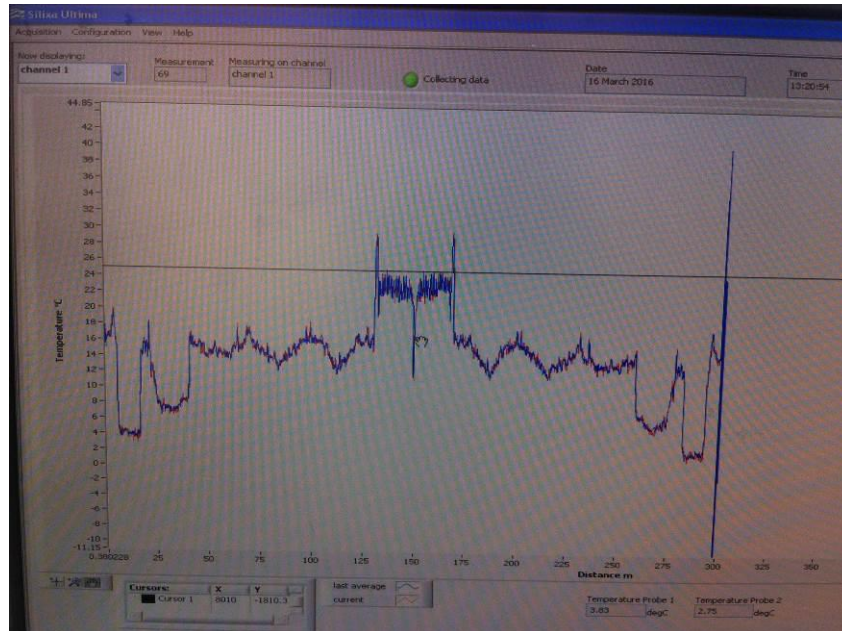
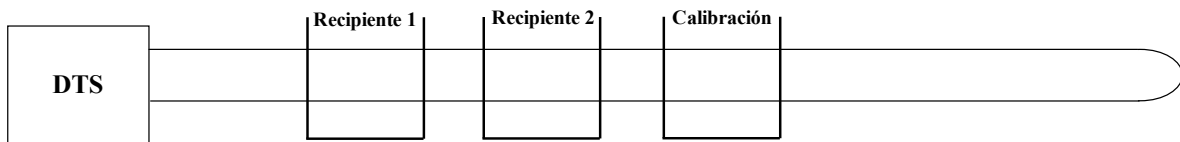
$$Ra_D = Gr_D Pr = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) D^3}{\nu^2} Pr \quad (9)$$

En las expresiones anteriores D (m) hace referencia al diámetro del cilindro, x (m) a la distancia desde el inicio del cable y u (m/s) es la velocidad del fluido. Las propiedades de éste quedan definidas por: k (J / m s K) la conductividad térmica, μ (Pa / s) viscosidad dinámica, c_p (J / kg K) el calor específico, ν (m² / s) la viscosidad cinemática y β (K⁻¹) el coeficiente de expansión volumétrica.

2.2. Experimentación

En el laboratorio del Grupo de Investigación de la Universidad Politécnica de Madrid, HIDER se llevó a cabo la parte experimental a partir de la instalación tal como muestra el esquema de la figura 3. En el recipiente 1, el fluido era lejía, en el recipiente 2, agua y en el tres contenía los elementos enfriadores del aire.

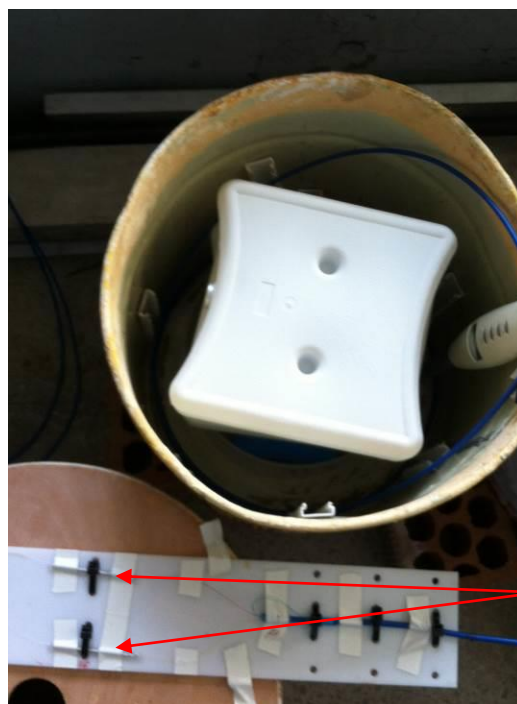
Figura 3. Esquema de la instalación de fibra óptica y captura de pantalla de la medida del DTS



La instalación se compone de un cable de 15,3 m de longitud con cuatro fibras ópticas de la marca BRUGGS. En esta experiencia, se empalmaron dos de ellas en su punto final (tal como se observa en la figura 4) de forma que la luz recorre 30,6 m. El empalme tiene la ventaja de que la temperatura en cada punto se mide dos veces por lo que se puede comprobar que el sistema funciona adecuadamente (las medidas de una y otra fibra tienen que ser simétricas, ver figura 3), a la vez que ambas medidas pueden promediarse y disminuir el error. Los 15,3 m están colocados en tres zonas de control: en las dos primeras, a temperatura ambiente, el cable está sumergido, primero en agua, y luego en un posible contaminante químico del agua (en este caso lejía, hipoclorito sódico) y, en la tercera el cable está al aire a temperatura controlada mediante enfriadores. Ésta última es la que sirve para la calibración de la instalación. La unidad DTS utilizada es el modelo Ultima004 – Silixa LDT) y el método de calibración elegido fue el interno del aparato utilizando los sensores de temperatura propios y las medidas de la temperatura se almacenaron cada 5 s.

La figura 4 muestra el recipiente que contenía el tramo de la tercera zona con el cable al aire.

Figura 4. Imagen del recipiente con el cable de fibra óptica al aire que sirvió de control



Empalmes fibras ópticas

El procedimiento de medida fue el siguiente: los primeros 5 minutos se usaron para calcular la temperatura media del fluido, después se calentó el cable durante 2,5 minutos y, finalmente, se esperó 12,5 minutos hasta que se completó la fase de enfriamiento del cable.

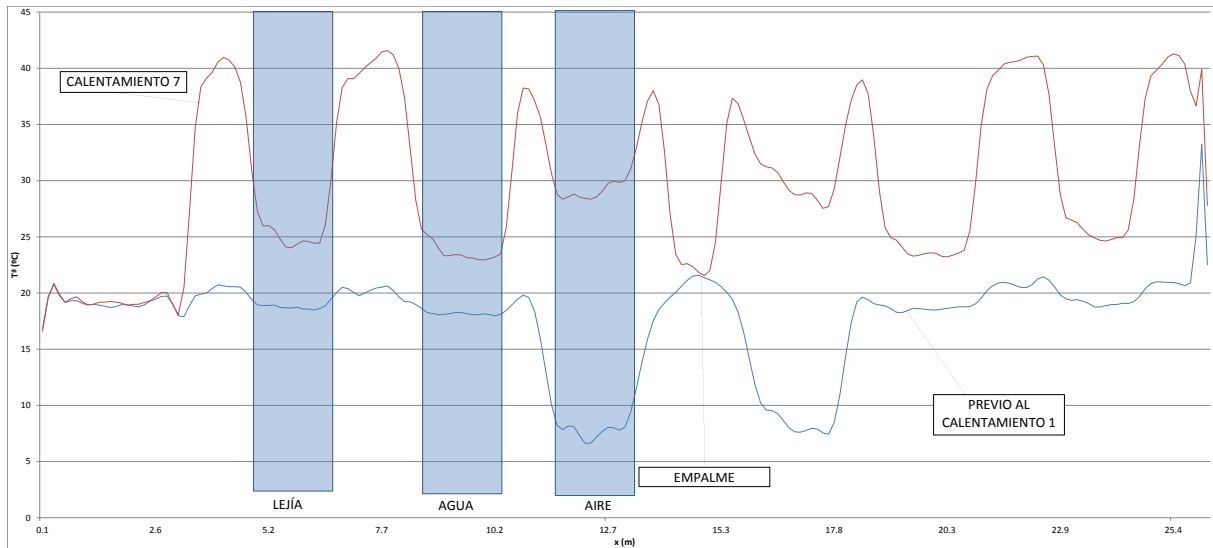
Se aplicaron pulsos con ocho potencias caloríficas: 0,5 W/m, 2,5 W/m, 3,5 W/m, 4,5 W/m, 5,5 W/m, 6,5 W/m, 7 W/m y 14,5 W/m para probar la sensibilidad del sistema al calor aportado:

3. Resultados

El modelo teórico utilizado en esta aplicación tiene el inconveniente de la variabilidad del coeficiente de convección h , ya sea en régimen natural o forzado. Este podría resolverse en la práctica, con métodos de calibración basados en los resultados habituales del fluido a monitorizar. De esta forma, cualquier vertido que se produjese de forma accidental en un fluido generaría una variación del coeficiente de convección respecto de los valores habituales.

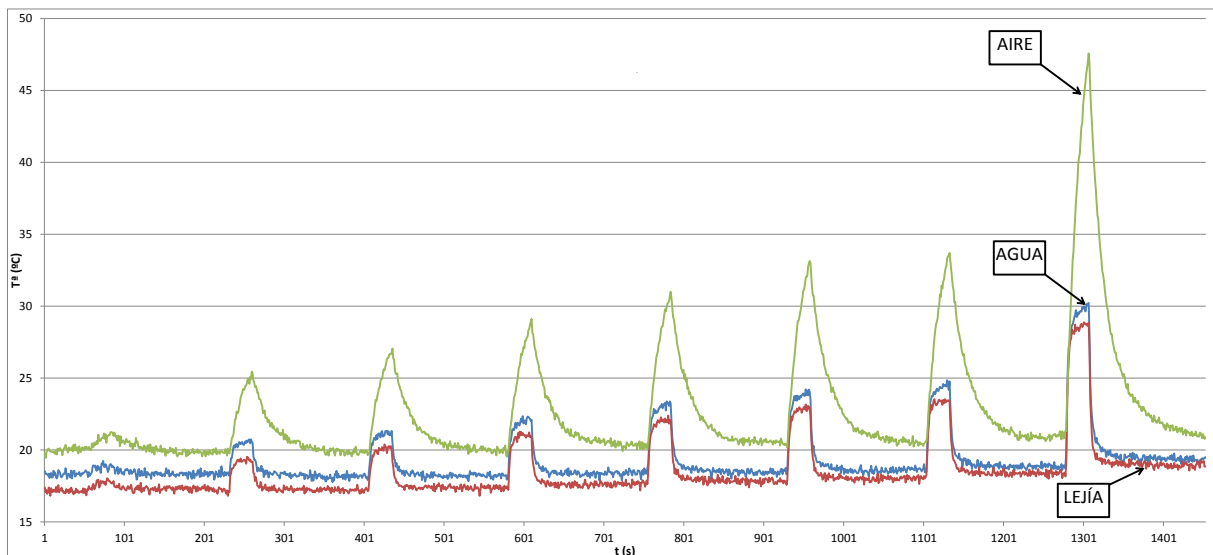
En la figura 5 muestra la temperatura a lo largo de todo el recorrido de fibra óptica antes y durante el calentamiento. En ella se observa, como la temperatura del aire es siempre mayor que la de los fluidos dados que su constante calorífica es más pequeña y la transmisión de calor es mayor.

Figura 5. Distribución de la temperatura a lo largo de la fibra óptica de la instalación antes y durante el calentamiento.



La figura 6 muestra la evolución de la temperatura del cable de fibra medida en tres puntos, uno por cada recipiente a lo largo del ensayo. En ella se e observan cuando se aplicaron los ocho pulsos caloríficos de diferente intensidad, provocando el calentamiento del cable y el aumento de temperatura en todos los fluidos y, en mayor medida, como era previsible, en el aire. Así mismo, también se observa que se alcanza el estado estacionario en los puntos sumergidos en agua y lejía, no así los puntos ubicados al aire. El recipiente con lejía tiene una temperatura inicial menor que en los otros dos. Al aumentar la potencia calorífica aumenta también el incremento de temperatura en todos los recipientes.

Figura 6. Evolución de la temperatura en tres puntos ubicados en los tres recipientes del experimento.



La tabla 1 muestra los parámetros medidos en cada uno de los experimentos, sabiendo que el calor aportado por cada unidad de superficie (q) depende de la magnitud del pulso y que la superficie que se imputa a cada punto es la que procede de un tramo de cable de 12,6 cm de longitud (resolución máxima que proporciona el DTS) y del diámetro del cable de fibra óptica, 0,00038 m.

Tabla 1. Parámetros correspondientes a la fase de calentamiento

Q (W/m)	h_{agua} (W / m ² °C)	$h_{\text{lejía}}$ (W / m ² °C)	$h_{\text{agua}} / h_{\text{lejía}}$
0,5	478,98	493,45	1.03
2,5	809,39	959,35	1.18
3,5	853,58	971,05	1.13
4,5	842,74	989,97	1.17
5,5	856,01	1.029,64	1.20
6,5	878,21	1.086,64	1.23
7,5	909,99	1.138,98	1.25
14,5	947,87	1.192,76	1.26

Los resultados muestran claramente la diferencia de los valores del coeficiente h en agua y lejía. Se observa además la variación positiva de dicho coeficiente al incrementarse la temperatura (la tendencia de fondo en cuanto a las temperaturas observadas en la figura 6 es creciente lo que muestra la existencia de cierta inercia térmica en los fluidos analizados), comportamiento que es acorde con la relación de proporcionalidad de los números de Nusselt y Rayleigh. Por otra parte, la capacidad para identificar la diferencia entre los fluidos se incrementa a medida que lo hace el pulso de calor proporcionado y la temperatura de fondo del fluido.

Las experiencias se han realizado con dos fluidos en estado puro en condiciones de convección natural en un futuro, convendría aplicar este método en condiciones de convección forzada para facilitar la aplicación de la técnica a instalaciones que tengan conducciones de fluidos.

Aparte, en un futuro conviene analizar la sensibilidad de la técnica ante fluidos con concentraciones diferentes de elementos e igualmente con otro tipo de fluidos potencialmente contaminantes químicos de las aguas. Para ello, ha lugar a mejorar los procedimientos para reducir la relación ruido-señal de la instrumentación que en la actualidad depende en gran parte del método de medida (medidas single frente a double ended).

Sin embargo, el método propuesto en este trabajo tiene la gran ventaja de ofrecer información continua en el espacio (los equipos actuales pueden proporcionar medidas de la temperatura con una distancia mínima de 0,126 cm que puede ampliarse usando la técnica del double ended) y en el tiempo (como mínimo 1s) y con la posibilidad de tender cables de fibra óptica de hasta 10 km en función de la sensibilidad y la precisión deseada.

4. Conclusiones

Los sistemas de medida basados en los sensores distribuidos de temperatura proporcionan una herramienta válida para el análisis de las características térmicas de los fluidos que sumergen al cable de fibra óptica. Su capacidad para identificar fluidos diferentes en función de su capacidad para transmitir el calor aplicado al cable de fibra depende no obstante de la bondad de la calibración y de la sensibilidad del instrumento.

Este método podría ser utilizado para detectar concentraciones de elementos potencialmente contaminantes en un fluido si se mejorase la relación ruido/señal. Su aplicación, a expensas de las mejoras en la calibración, se extendería a cualquier tipo de conducción de fluidos en las que se requiriese la detección

En esta línea, en un futuro se debe evaluar la sensibilidad del modelo ante pequeñas variaciones en la concentración de contaminantes en el agua y de esta forma, detectar posibles episodios puntuales de contaminación.

5. Referencias

- Benítez-Buelga, J.; Sayde, C.; Rodríguez-Sinobas, L., Selker, J. (2014). Heated fiber optic distributed temperature sensing for measuring soil volumetric heat capacity and water content: A dual probe heat-pulse approach. *Vadose Zone Journal*, 13(11): 13-20.
- Benitez-Buelga, J., Rodríguez-Sinobas, L., García-Calvo, R., Gil-Rodríguez, M., Sayde, C., Selker, J. (2016). Calibration of soil moisture sensing with subsurface heated fiber optics using numerical simulation. *Water Resources Research*. DOI: 10.1002/2015WR017897.
- Briggs, M. A., Lautz, L. K., Mckenzie, J. M., Gordn, R. P., & Hare, D. K. (2012). Using high resolution distributed temperature sensing to quantify spatial and temporal variability in vertical hyporheic flux. *Water Resources Research*, 48.
- Gil Rodríguez, M.; Rodríguez Sinobas, L.; Benitez Buelga, J. y 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.
- Lowry, C. S., Walker, J. F., Hunt, R. J., & Anderson, M. P. (2007). Identifying spatial variability of groundwater discharge in wetland stream using a distributed temperature sensor. *Water Resources Research*, 43.
- Smolen, J. J., van der Spek, A. (2003). Distributed Temperature Sensing. A DTS Primer for Oil & Gas Production. La Haya, SIEP BV.
- Sourbeer, J. J., & Loheide II, S. P. (2015). Obstacles to long-term soil moisture monitoring with heated distributed temperature sensing. *Hydrological Processes*, 30(7):1017-1035.
- Sayde, C., Gregory, C., Rodríguez, M., Tufillaro, N., Tyler, S., Van de Giesen, N., English, M., Cuenca, R., & Selker, J. S. (2010). Feasibility of soil moisture monitoring with heated fiber optics. *Water Resources Research*, 46.
- Sayde C., Benitez, J. B., Rodríguez, L., Loraine, E. K., English, M., Van de Giesen, N., & Selker, J. S. (2014). Mapping variability of soil water content and flux across 1-1000 m scales using the actively heated fiber optic method. *Water Resources Research*, 50.
- Selker, J. S., Van de Giesen, N., Westhoff, M., Luxemburg, W., & Parlange, M.B. (2006). Fiber optics open window on stream dynamics. *Geophysical Research Letters*, 33.
- Selker, J. S., Thévenaz, L., Huwald, H., Mallet, A., Luxemburg, W., Van de Giesen, N., Stejskal, M., Zeman, J., Westhoff, M., & Parlange, M.B. (2006). Distributed fiber optic temperature sensing for hydrologic systems. *Water Resources Research*, 42.
- Vercauteren, N., Huwald, H., Bou-Zeid, E., Selker, J. S., Lemmin, U., Parlange, M. B., Lunati, I. (2011). Evolution of superficial lake water temperature profile under diurnal radiative forcing. *Water Resources Research*, 47.