

# Evaluación del método activo para determinar contenidos de humedad en suelos

## Assessment of the active method to determine soil moisture

Serna, J. L.<sup>a1,b</sup>, Muñoz, J. F.<sup>a2</sup> y Suárez, F.<sup>a3,c,d</sup>

<sup>a</sup> Pontificia Universidad Católica de Chile, Avda. Vicuña Mackenna 4860 - Santiago – Chile  
E-mail: <sup>a1</sup> jlserna@uc.cl, <sup>a2</sup> jfmunoz@ing.puc.cl, <sup>a3</sup> fsuarez@ing.puc.cl

<sup>b</sup> Universidad Alas Peruanas Filial Tumbes, Avda. Tumbes Norte 1662, Tumbes, Perú

<sup>c</sup> Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS), Avda. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

<sup>d</sup> Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Avda. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

Recibido: 03/11/2016

Aceptado: 04/07/2017

Publicado: 31/07/2017

**Citar como:** Serna, J. L., Muñoz, J. F., Suárez, F. 2017. Assessment of the active method to determine soil moisture. *Ingeniería del agua*, 21(3), 165-178. <https://doi.org/10.4995/la.2017.6802>

## RESUMEN

En los últimos años las mediciones distribuidas de temperaturas con cables de fibra óptica (FO-DTS) se han utilizado con éxito para investigar una amplia gama de procesos hidrológicos. En particular, con la tecnología FO-DTS se han desarrollado dos métodos para monitorear el contenido de humedad volumétrico en suelos ( $\theta$ ): el método pasivo y el método activo. Este trabajo presenta una evaluación del método activo para determinar el  $\theta$  de un suelo arenoso. En este método, se utilizan cables de fibra óptica con elementos metálicos, donde se aplica una diferencia de voltaje entre sus extremos para calentarlo durante un período de tiempo determinado. Luego, se utiliza una relación empírica para relacionar el  $\theta$  con un parámetro denominado temperatura acumulada ( $T_{cum}$ ). Para aplicar el método activo se propuso una relación potencial definida por tramos, la cual depende de las propiedades hidrodinámicas del suelo estudiado. Distintos experimentos fueron realizados para evaluar el método activo. Estos experimentos tuvieron distintas duraciones del pulso de calor (2, 5, 10 y 20 min con potencias eléctricas de 2.1, 2.6, 2.3 y 2.4 W/m, respectivamente), y permitieron determinar la duración óptima del pulso de calor ( $t_p$ ), el tiempo de integración óptimo ( $\Delta t$ ), el tiempo final óptimo de integración ( $t_o$ ) utilizado en el cálculo de la temperatura acumulada, y la corriente óptima ( $I$ ) que debe circular por el cable de fibra óptica para generar el pulso de calor. Los resultados revelan que los parámetros óptimos son:  $t_p = 1200$  s,  $\Delta t = 150$  s,  $t_o = t_p$ , e  $I \approx 17$  A (2.4 W/m). Este análisis permitió obtener contenidos de humedad que van desde 0.14 hasta 0.46 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, con errores menores que 0.08 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.

**Palabras clave** | mediciones distribuidas de temperatura con cables de fibra óptica (FO-DTS); método activo; contenido de humedad volumétrico.

## ABSTRACT

*In recent years, fiber-optic distributed temperature sensing (FO-DTS) methods have been successfully used to investigate a wide range of hydrological applications. In particular, two methods have been developed to monitor the soil water content ( $\theta$ ) with the FO-DTS technology: the passive and the active methods. This work presents an assessment of the active method to determine the  $\theta$  of a sandy soil. In this method, fiber-optic cables with metallic armoring are used and a voltage difference is applied between the two ends of the cable to warm it during a specified time period. Then, an empirical relationship is used to relate  $\theta$  with a parameter called cumulative temperature ( $T_{cum}$ ). To apply the active method, we propose a potential relationship defined by stretches, which depends on the hydrodynamic properties of the soil studied. Different experiments were carried out to assess the active method. These experiments had different heat pulse durations (2, 5, 10 and 20 min with electrical powers of 2.1, 2.6, 2.3 and 2.4 W/m, respectively), and allowed determining the optimum heat pulse duration ( $t_p$ ), the optimum temporal integration interval ( $\Delta t$ ), the optimum final time of integration ( $t_o$ ) used in the calculation of the cumulative temperature, and the optimum current ( $I$ ) that should circulate through the*

fiber-optic cable to generate the heat pulse. Results show that the optimum operating parameters are:  $t_r = 1200$  s  $\Delta t = 150$  s,  $t_0 = t_r$  and  $I \approx 17$  A (2.43 W/m). Our analysis allowed obtaining volumetric water contents ranging from 0.14 to 0.46  $m^3/m^3$ , with errors that are smaller than 0.08  $m^3/m^3$ .

**Key words** | fiber-optic distributed temperature sensing (FO-DTS); active method; volumetric water content.

## INTRODUCCIÓN

La necesidad de entender y predecir interacciones entre procesos hidrológicos y atmosféricos ha promovido el estudio del contenido de humedad de suelos a nivel mundial y para distintos tipos de climas (Entekhabi *et al.*, 1996). Recientemente, los métodos distribuidos de temperatura utilizando cables de fibra óptica (FO-DTS, por sus siglas en inglés), han sido empleados para determinar posibles fugas de agua en presas de materiales sueltos (Muñoz *et al.*, 2016) así como flujos de agua y contenidos de humedad volumétricos ( $\theta$ ) en el subsuelo (Weiss, 2003; Aufleger *et al.*, 2005; Perzmaier *et al.*, 2006; Steele-Dunne *et al.*, 2010; Sayde *et al.*, 2010, 2014; Ciocca *et al.*, 2012; Striegl y Loheide, 2012; Gil-Rodríguez *et al.*, 2013; Cao *et al.*, 2015; Benítez-Buelga *et al.*, 2016; Dong *et al.*, 2016). Estos métodos utilizan la reflexión de luz al interior de un cable de fibra óptica para determinar la temperatura a lo largo del cable. Los métodos FO-DTS permiten monitorear temperaturas con una resolución espacial de 0.25-2.0 m, una resolución temporal de 1-60 s y una precisión de temperatura de  $\pm 0.01^\circ\text{C}$ , a lo largo de cables de hasta 10 km de longitud (Selker *et al.*, 2006; Tyler *et al.*, 2009; Suárez *et al.*, 2011). Recientemente se han desarrollado los métodos pasivo y activo que han permitido cuantificar  $\theta$  con una mayor precisión que en el pasado (Steele-Dunne *et al.*, 2010; Sayde *et al.*, 2010). En estos métodos, el cable de fibra óptica debe ser enterrado a distintas profundidades del suelo.

En el método activo, el sistema FO-DTS utiliza cables de fibra óptica con elementos metálicos (conductores eléctricos), donde una diferencia de voltaje se aplica entre los extremos del cable para calentarlo durante un periodo de tiempo determinado. Luego, se utiliza una relación empírica que -generalmente corresponde a una función exponencial- para relacionar los aumentos de temperatura en el suelo con el  $\theta$ . Sayde *et al.* (2010) desarrollaron el método activo y demostraron que se puede cuantificar  $\theta$  de manera más precisa que la realizada en el pasado. Gil-Rodríguez *et al.* (2013) utilizaron este método para investigar en el laboratorio los patrones de humectación de un suelo sometido a riego por goteo, mientras que Sayde *et al.* (2014) lo emplearon en condiciones de campo a escalas de 1-1000 m, donde mapearon el  $\theta$  y los flujos inducidos por la aplicación no uniforme de agua en la superficie del suelo. Por otro lado, Benítez-Buelga *et al.* (2016) desarrollaron una metodología para calibrar el  $\theta$  en suelos heterogéneos usando simulaciones numéricas. En estos estudios, los pulsos de calor fueron aplicados con diferencias de voltaje que variaron entre 10 y 20 W/m.

La ventaja de utilizar el método activo para determinar  $\theta$  utilizando la tecnología FO-DTS es que solamente se requiere un cable que permita aplicar el pulso de calor y monitorear la disipación de energía. Debido a que los métodos FO-DTS solamente requieren una calibración para poder determinar la temperatura a lo largo de todo el cable (Suárez *et al.*, 2011), se elimina la incertidumbre que existe al tener múltiples calibraciones de sensores (uno de los principales problemas al realizar mediciones puntuales con múltiples sensores). Adicionalmente, la escala espacial que se puede alcanzar con métodos FO-DTS permite observar fenómenos que ocurren desde centímetros incluso hasta kilómetros, lo que abre una nueva ventana al entendimiento de los procesos físicos que ocurren en el medioambiente.

A pesar de que existen estudios que han investigado el método activo para determinar  $\theta$  (Sayde *et al.*, 2010, 2014; Ciocca *et al.*, 2012; Striegl y Loheide, 2012; Gil-Rodríguez *et al.*, 2013; Benítez-Buelga *et al.*, 2016), no existen trabajos que presenten una evaluación sistemática de la exactitud y precisión de esta metodología, y que incorporen una base física en las ecuaciones empíricas. Por lo tanto, esta investigación busca complementar las investigaciones anteriores mediante un análisis de sensibilidad del método activo y proponer una expresión para relacionar el aumento de temperatura en el suelo con el  $\theta$  que incorpore restricciones dadas por las propiedades hidrodinámicas del suelo.

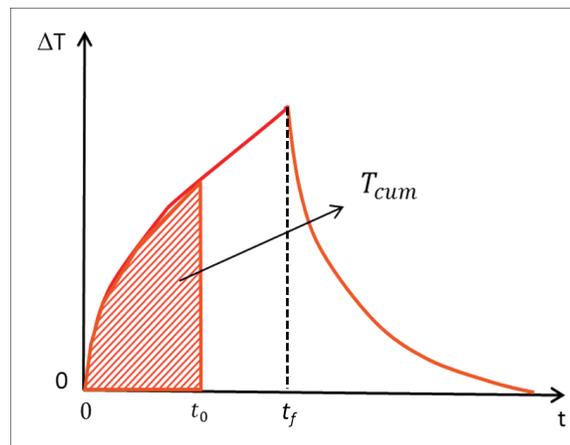
## TEORÍA

### Método activo para la determinación del contenido de humedad volumétrico

Este método empírico correlaciona el  $\theta$  y la respuesta térmica del suelo a un pulso de calor de duración  $t_f$ , generado a lo largo de un cable de FO-DTS. Sayde *et al.* (2010) propusieron cuantificar la respuesta térmica del suelo utilizando un parámetro denominado temperatura acumulada,  $T_{cum}$  ( $^{\circ}\text{C s}$ ):

$$T_{cum} = \int_0^{t_0} \Delta T(t) dt \quad (1)$$

donde  $\Delta T(t) = T(t) - T(t=0)$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) es la diferencia de temperatura en una posición específica del cable entre el tiempo  $t$  (s) y el tiempo donde se comienza a aplicar el pulso de calor ( $t=0$ ), y  $t_0$  (s) es el tiempo total de integración. La Figura 1 muestra gráficamente el concepto de temperatura acumulada en un segmento específico del cable de fibra óptica, para el caso general donde el tiempo total de integración ( $t_0$ ) es distinto a la duración del pulso de calor ( $t_f$ ).



**Figura 1** | Aumento de temperatura en un punto específico de la fibra óptica.  $t_f$  es el tiempo final de la aplicación del pulso de calor y  $t_0$  es el tiempo de integración utilizado para calcular la temperatura acumulada ( $T_{cum}$ ).

Una vez conocido el aumento de temperatura en cada segmento de cable, es posible correlacionar  $T_{cum}$  y  $\theta$ , si es que se tienen mediciones independientes de este último. Para generar la curva de calibración, Sayde *et al.* (2010) propusieron construir una columna experimental de suelo donde se fija la profundidad del nivel freático y se instalan sensores del contenido de humedad a distintas profundidades. Es decir, se tiene una columna de suelo con una determinada humedad,  $\theta$ , a una profundidad  $z$ . Por lo tanto, la temperatura acumulada en cada profundidad de esta columna puede ser expresada como:

$$T_{cum}(z, \theta(z)) = \int_0^{t_0} \Delta T(z, \theta(z), t) dt \quad (2)$$

La ecuación (2) muestra de manera explícita la relación entre el perfil de temperatura acumulada y el perfil del  $\theta$ . Matemáticamente, la correlación entre  $T_{cum}$  y  $\theta$  se puede construir con cualquier expresión que prediga una disminución de  $T_{cum}$  a medida que aumenta  $\theta$ . Esto típicamente se ha realizado con funciones exponenciales (Sayde *et al.*, 2010; Striegl y Loheide, 2012; Gil-Rodríguez *et al.*, 2013). En el presente estudio, para representar la relación entre  $T_{cum}$  y  $\theta$ , se decidió utilizar una expresión potencial definida por tramos, tal como se presenta en la ecuación (3):

$$D\theta S(z) = \begin{cases} \theta_r & aT_{cum}(z, \theta)^b \leq \theta_r \\ aT_{cum}(z, \theta)^b & \theta_r < aT_{cum}(z, \theta)^b \leq \theta_s \\ \theta_s & aT_{cum}(z, \theta)^b > \theta_s \end{cases} \quad (3)$$

donde el  $\theta$ , estimado a partir de las mediciones FO-DTS, se ha denominado D $\theta$ S (*distributed moisture sensing*, nomenclatura propuesta por Striegl y Loheide (2012));  $a$  y  $b$  son parámetros empíricos de ajuste; y  $\theta_r$  y  $\theta_s$  son los contenidos de humedad volumétricos residual y de saturación, respectivamente, los cuales se pueden determinar en base a la curva de retención de humedad del suelo. En la ecuación (3), los límites de los tramos se han definido para entregarle una base física a la determinación de DqS, de modo que la humedad fluctúe entre  $\theta_r$  y  $\theta_s$ . Para encontrar los parámetros empíricos de la ecuación (3), i.e.,  $a$  y  $b$ , se debe minimizar el error cuadrático medio entre las estimaciones D $\theta$ S y los valores de  $\theta$  medidos con sensores independientes, que en este caso corresponden a mediciones realizadas con reflectometría de dominio temporal (TDR) (Cristi et al., 2016).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Propiedades del suelo utilizado

Para evaluar sistemáticamente el método activo se empleó un suelo arenoso. Se realizaron experiencias de laboratorio para determinar la distribución granulométrica y la curva de retención de humedad,  $\theta(h)$ , de este suelo. La distribución granulométrica se realizó empleando la metodología propuesta por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Black et al., 1965). La curva de retención de humedad del suelo,  $\theta(h)$ , se determinó combinando el método de la evaporación (Peters y Durner, 2008) con el método del extractor de presión (Rowell, 2014). El método de la evaporación se utilizó para determinar la retención de humedad en la zona húmeda de la curva (succiones entre 0 y 0.6 bar). Este método fue realizado en el laboratorio utilizando un sistema de medición denominado HYPROP (*HYdraulic PROProperty analyzer*, UMS GmbH, Munich, Alemania), el cual se muestra en la Figura 2(a). El método del extractor de presión (Rowell, 2014) se utilizó para determinar la retención de humedad en la zona seca de la curva (succiones entre 1 y 4 bar). En este método, la misma muestra de suelo empleada en el método de la evaporación se satura y se introduce dentro de un extractor de presión (1660 5 bar pressure plate extractor, Soilmoisture Equipment Corp., Santa Barbara, CA, Estados Unidos), el cual se hace funcionar bajo condiciones de secado. La Figura 2(b) muestra el extractor de presión utilizado en esta investigación.

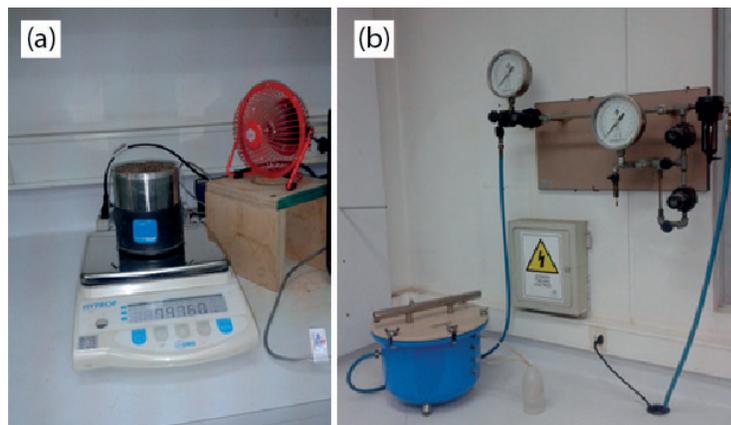
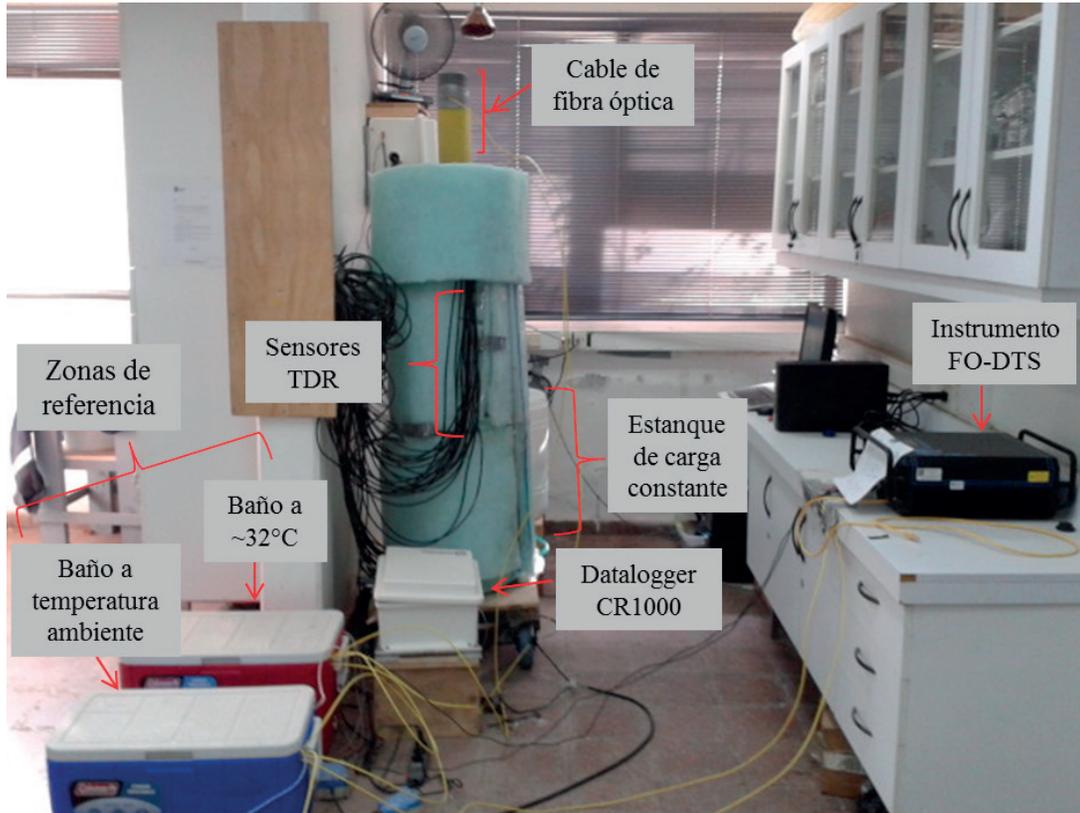


Figura 2 | (a) Fotografía del instrumento HYPROP con la muestra de suelo. (b) Fotografía del extractor de presión.

### Instalación experimental

Se construyó una instalación experimental que permitió evaluar el método activo para la determinación del  $\theta$ . La instalación consta de (Figura 3): 1) una columna de suelo instrumentalizada con sensores de humedad y con un sistema que permite fijar la profundidad del nivel freático; 2) un sistema de medición FO-DTS de alta resolución espacial, que además tiene un cable con elementos conductores de corriente; y 3) un sistema eléctrico que permite hacer circular una intensidad de corriente a través del cable de fibra óptica (no mostrado en Figura 3).



**Figura 3 |** Fotografía de la instalación experimental que se utilizó para evaluar el método activo.

La columna de suelo tiene un diámetro interno de 0.38 m y una altura de 1.50 m. En los 0.90 m superiores de la columna se instalaron 20 sensores de humedad (TDR CS-645, Campbell Sci. Logan, UT, Estados Unidos). Los sensores de humedad fueron conectados a un dispositivo de almacenamiento de datos (CR1000, Campbell Sci., Logan, UT, Estados Unidos) y los datos experimentales fueron recolectados cada 5 min.

El cable de fibra óptica es un cable de tubo holgado (*loose-tube*) de 224 m de largo, con un diámetro externo de 4.5 mm y una resistencia eléctrica de  $10 \Omega \text{ km}^{-1}$  a  $20^\circ\text{C}$  (DNS-3454, AFL Telecommunications, Spartanburg, SC, Estados Unidos). El cable está compuesto por cuatro fibras –dos multi-modal y dos mono-modal– de  $50/125 \mu\text{m}$  de diámetro (núcleo/recubrimiento), protegidas con un gel tixotrópico y por un tubo de acero de 2 mm de diámetro. El tubo de acero, a su vez, se encuentra recubierto por seis filamentos de acero y seis filamentos de cobre de 0.6 mm de diámetro cada uno. El cable de fibra óptica fue conectado a un instrumento FO-DTS (Ultima-XT DTS, Silixa, Hertfordshire, Inglaterra). Este instrumento, de acuerdo a la información del fabricante, tiene una resolución menor que  $0.1^\circ\text{C}$  (a intervalos de integración temporal de 3 min) y una resolución espacial de monitoreo de 0.25 m.

Las principales características del sistema regulador de corriente son: 1) tiene un regulador (*dimmer*) que controla el flujo de corriente eléctrica a través del sistema. 2) posee un multímetro digital para registrar la corriente real que fluye a través del cable de fibra óptica y el voltaje existente entre ambos extremos del circuito eléctrico; 3) tiene un temporizador que permite fijar la duración de los pulsos de corriente; y 4) posee un computador de lógica programable (PLC), (Weintek Labs., Inc., Taiwan).

## Evaluación del método activo

Para comparar las distintas experiencias y cuantificar la precisión del método activo se utilizaron el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) (Bennett et al., 2013):

$$r^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{TDR_i} - \bar{\theta}_{TDR})(D\theta S_i - \bar{D\theta S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_{TDR_i} - \bar{\theta}_{TDR})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (D\theta S_i - \bar{D\theta S})^2}} \right)^2 \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_{TDR_i} - D\theta S_i)^2} \quad (5)$$

donde  $\theta_{TDR_i}$  representa el  $\theta$  medido por el sensor TDR número  $i$ ,  $\bar{\theta}_{TDR}$  es el valor promedio de las mediciones de humedad basadas en los sensores TDR,  $D\theta S_i$  es el  $\theta$  estimado a partir del método activo a la misma profundidad del sensor TDR número  $i$ , es el valor promedio de las estimaciones de humedad estimadas por el método activo, y  $n$  el número total de datos.

Para evaluar el método activo se estudió el efecto que tiene la duración del pulso de calor ( $t_p$ ) en la determinación del  $\theta$  estimado a partir del método activo. Se aplicaron cuatro pulsos de calor con una duración de 2, 5, 10 y 20 min con intensidades de corriente promedio de 16.5, 18.3, 17.2 y 17.5 A, respectivamente, que corresponden a potencias de 2.1, 2.6, 2.3 y 2.4 W/m. Estos pulsos de calor permitieron obtener cuatro curvas de calibración:  $D\theta S_2$ ,  $D\theta S_5$ ,  $D\theta S_{10}$  y  $D\theta S_{20}$ . Estas experiencias se realizaron para dos profundidades del nivel freático: 0.90 y 1.20 m. Además, este análisis permitió determinar la duración mínima del pulso de calor que permite obtener  $\theta$  con una mejor precisión. Para cada pulso de calor se ajustaron los parámetros  $a$  y  $b$  que definen la relación entre  $T_{cum}$  y  $D\theta S$  (ecuación (3)). Asimismo, se estudió el efecto que tiene el intervalo de integración ( $\Delta t$ ) usado en el cálculo de la temperatura acumulada ( $T_{cum}$ ) sobre la precisión en la determinación del  $\theta$  estimado con el método activo. Una vez definido el  $\Delta t$  óptimo, se investigó el impacto que tiene el tiempo de integración de  $T_{cum}$  sobre la estimación del  $\theta$ . Con este propósito, se definió un tiempo de integración  $t_o$  distinto que la duración del pulso de calor ( $t_p$ ), tal como se muestra en la Figura 1.

Para evaluar el efecto que tiene la intensidad de corriente ( $I$ ), se realizaron tres experiencias con distintas intensidades medias de corriente de 14.6, 18.2 y 22.8 A, correspondientes a potencias de 1.7, 2.6 y 4 W/m. En cada una de estas experiencias se aplicaron pulsos de calor de 5 min de duración después de que la columna de suelo había sido drenada por gravedad.

## Validación del método activo de determinación distribuida de humedades

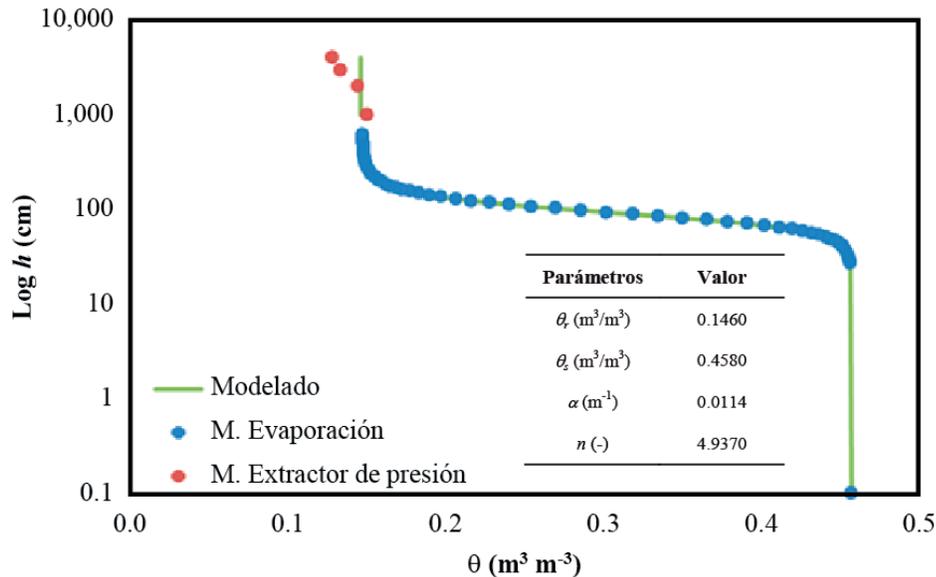
Una vez definidos los parámetros óptimos de operación del método activo ( $t_p$ ,  $\Delta t$ ,  $t_o$ ,  $I$ ), para validar los resultados se evaluó la curva de calibración obtenida bajo condiciones óptimas en dos experiencias distintas. La primera experiencia de validación correspondió a una repetición de un experimento realizado bajo las mismas condiciones hidráulicas a las utilizadas para la generación de la curva de calibración. La segunda experiencia de validación se realizó para condiciones hidráulicas distintas a las utilizadas para construir la curva de calibración. La validación se realizó comparando los resultados  $D\theta S$  y el contenido de humedad medido por los sensores TDR.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Propiedades del suelo utilizado

La curva granulométrica permitió determinar la textura y la distribución del tamaño de partículas del suelo. Se obtuvo que el suelo utilizado en este estudio tiene la siguiente textura: 96% de arena, 2% de limo y 2% de arcilla; con un coeficiente de uniformidad de 2.7, un coeficiente de curvatura de 1.2 y una densidad específica de partículas sólidas de 2730 kg/m. Por lo tanto, puede clasificarse como arena mal graduada (Klute, 1994).

La Figura 4 muestra los resultados experimentales de la curva de retención de humedad, el ajuste del modelo de van Genuchten (1980) y sus respectivos parámetros. El modelo de van Genuchten (1980) tiene un buen ajuste con respecto a los valores experimentales ( $r^2 = 0.99$ ), y permite determinar que la humedad varía entre  $0.146$  y  $0.458 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Este rango de humedades permite definir los tramos de la relación entre  $T_{cum}$  y  $\theta$  (ecuación (3)), para la estimación de  $D\theta S$ .



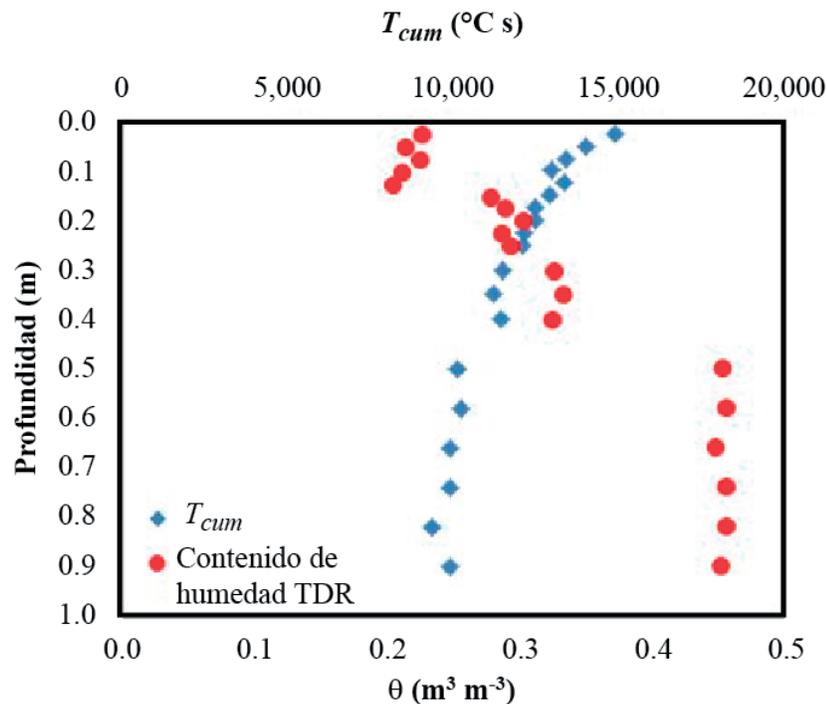
**Figura 4** | Curva de retención de humedad determinada experimentalmente combinando el método de la evaporación (Peters y Durner, 2008) con el método del extractor de presión (Rowell, 2014), y el modelo de van Genuchten (1980) ajustado a la información experimental.

## Evaluación del método activo

### Efecto de la duración del pulso de calor ( $t_r$ ) sobre la determinación del $\theta$

En esta sección solamente se presentan los resultados asociados al nivel freático ubicado a  $1.20 \text{ m}$  de profundidad debido a que esta condición genera un rango de humedades más amplio en comparación al rango de humedades obtenido cuando el nivel se encuentra a  $0.90 \text{ m}$  de profundidad. Los resultados del método cuando el nivel freático está a  $0.90 \text{ m}$  de profundidad se presentan en la validación del método.

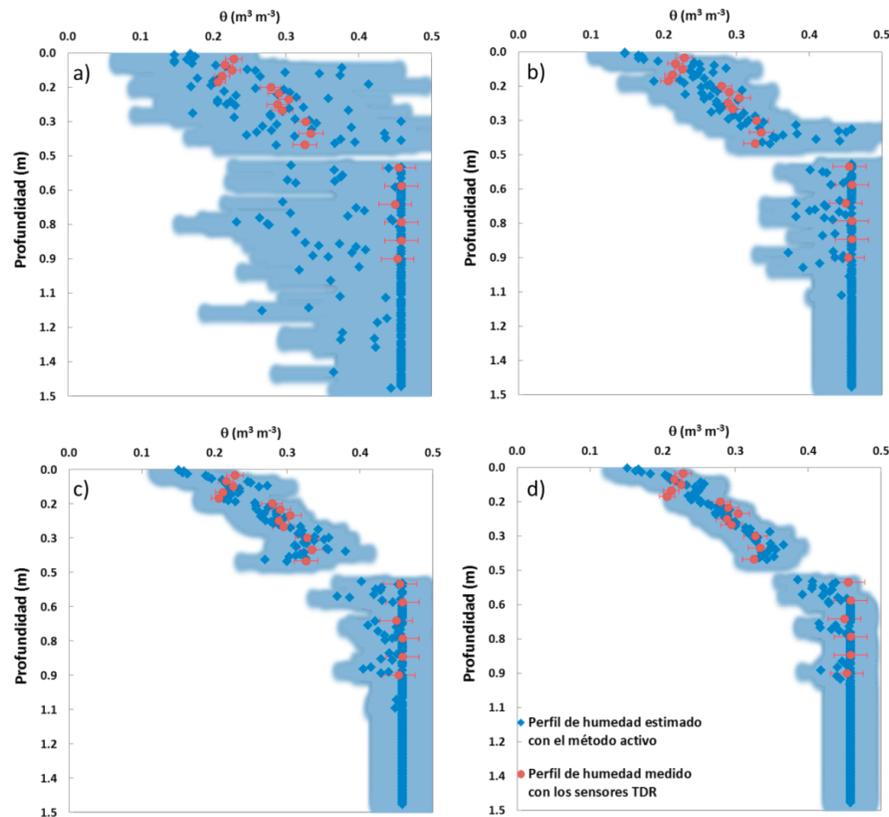
El método activo requiere primero de la determinación de la relación entre  $T_{cum}$  y el  $\theta$  medido con los sensores TDR. La Figura 5 presenta, a modo de ejemplo, una comparación entre  $T_{cum}$  y el  $\theta$  medido con los sensores TDR para un pulso de calor de  $20 \text{ min}$  de duración. En la Figura 5 solamente se presentan los valores de  $T_{cum}$  que están ubicados a la misma profundidad donde existe una medición con sensores TDR. En este caso, el  $\theta$  varía entre  $0.228$  y  $0.458 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , y los valores de  $T_{cum}$  varían entre  $8400$  y  $16300^\circ\text{C s}$ . Estos valores de  $T_{cum}$  son mayores que los obtenidos por Sayde *et al.* (2010), los cuales varían entre  $1100$  y  $2500^\circ\text{C s}$ , debido a que en sus experiencias los pulsos de calor tuvieron una duración de  $2 \text{ min}$ . No obstante, en las experiencias de Sayde *et al.* (2010) se utilizó una potencia de  $\sim 20 \text{ W/m}$ , lo que se tradujo en aumentos de temperatura de hasta  $\sim 20^\circ\text{C}$ . Por otro lado, en las experiencias reportadas en este trabajo la potencia fue del orden de  $\sim 2\text{-}3 \text{ W/m}$  con incrementos de térmicos de hasta  $\sim 15^\circ\text{C}$ .



**Figura 5** | Comparación del perfil de  $\theta$  y  $T_{cum}$  al aplicar un pulso de calor de 20 min. El nivel freático se encuentra a 1.20 m de profundidad.

En la Figura 6 se muestran los perfiles de humedad estimados con cada una de las curvas de calibración D $\theta$ S. Estas curvas permiten estimar  $\theta$  en todo el perfil del suelo con una resolución espacial vertical de  $\sim 6.5$  mm. La Figura 6 demuestra que a medida que aumenta la duración del pulso, disminuyen los errores asociados a las mediciones (ver Tabla 1). Cuando se aplica un pulso de calor de 2 min, los resultados obtenidos con la curva de calibración están sujetos a un error importante (Figura 6(a)), mientras que, al aplicar un pulso de calor de 20 min, se estima de buena forma el contenido de humedad. Para estimar los perfiles de humedad con distintas duraciones del pulso de calor (2, 5, 10 y 20 min), en este trabajo se aplicaron potencias eléctricas del orden del 10% de la potencia aplicada por Sayde *et al.* (2010), quienes para pulsos de 2 min de duración obtuvieron precisiones mucho mejores que las presentadas en la Figura 6(a), pero del mismo orden que las observadas en la Figura 6(d). Estos resultados sugieren que la energía utilizada por Sayde *et al.* (2010) y en el presente trabajo es similar. De hecho, un pulso de 2 min (120 s) de duración a  $\sim 20$  W/m corresponde a  $\sim 2400$  J/m, mientras que un pulso de 20 min (1200 s) de duración a  $\sim 2$  W/m también corresponde a  $\sim 2400$  J/m.

En la Tabla 1 se presentan los parámetros de ajuste de cada una de las curvas de calibración D $\theta$ S ( $a$  y  $b$ ) y las métricas de evaluación del método activo ( $r^2$  y  $RMSE$ ). La Tabla 1 demuestra claramente que a mayor duración del pulso de calor mejor es la estimación de  $\theta$ , confirmando así la hipótesis de Sayde *et al.* (2010) y de Striegel y Loheide (2012). No obstante, es importante tener claro que el aumento de la duración del pulso de calor también implica un aumento en la demanda energética del sistema, lo cual puede ser relevante en instalaciones remotas y limita la duración del pulso de calor.



**Figura 6 |** Perfil de humedad estimado con pulsos de calor de distinta duración: a) 2 min; b) 5 min; c) 10 min; y d) 20 min. El área achurada (color azul), corresponde al error que se puede obtener al estimar  $\theta$  con D $\theta$ S.

**Tabla 1 |** Parámetros de calibración (a y b), y métricas de evaluación ( $r^2$  y RMSE) obtenidos en las experiencias con distintas duración del pulso de calor.

$t_f$ (min)	Parámetros de ajuste		$r^2$	RMSE ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )
	a	b		
2	$1.5 \cdot 10^9$	-4.0369	0.59	0.079
5	$1.96 \cdot 10^{11}$	-3.7303	0.82	0.042
10	$1.89 \cdot 10^9$	-2.7349	0.88	0.033
20	$5.94 \cdot 10^8$	-2.2778	0.91	0.026

### Efecto del intervalo de integración ( $\Delta t$ ) sobre la determinación del contenido de humedad

Para evaluar cuál es la influencia del  $\Delta t$  sobre la determinación del  $\theta$  a través del método activo, se agregaron los datos de temperatura FO-DTS en seis intervalos de tiempo distintos para un pulso de calor de 20 min y el nivel freático a 1.20 m de profundidad (Tabla 2). Las métricas de evaluación asociadas a las mediciones de temperatura FO-DTS mejoran a medida que se aumenta el intervalo de integración temporal. La Tabla 2 evidencia que considerar datos de temperatura promedio con intervalos de tiempo mayores a 5 s no mejora la precisión del método activo.

**Tabla 2** | Parámetros de calibración ( $a$  y  $b$ ), y métricas de evaluación ( $r^2$  y  $RMSE$ ) de las curvas  $D\theta S_{20}$  con  $\Delta t = 5, 10, 15, 30, 60$  y  $150$  s.

$\Delta t$ (s)	Parámetros de ajuste		$r^2$	RMSE ( $m^3/m^3$ )
	a	b		
5	$5.49 \cdot 10^8$	-4.2778	0.9134	0.0258
10	$6.25 \cdot 10^8$	-2.2834	0.9135	0.0258
15	$5.90 \cdot 10^8$	-2.2780	0.9135	0.0258
30	$5.75 \cdot 10^8$	-2.2780	0.9134	0.0258
60	$5.45 \cdot 10^8$	-2.2783	0.9136	0.0258
150	$4.86 \cdot 10^8$	-2.2747	0.9142	0.0256

De la Tabla 2 se evidencia que no existen diferencias significativas entre cada uno de los ajustes. Sin embargo, se obtiene un mejor ajuste y por tanto una mejor estimación del  $\theta$  a partir de la curva de calibración  $D\theta S_{20}$  con  $\Delta t=150$  s. Estos resultados son consistentes con el análisis realizado por Sayde *et al.* (2010), quienes enfatizan que, al utilizar mediciones FO-DTS, la varianza de la temperatura acumulada es minimizada debido a que las mediciones FO-DTS están fundamentalmente basadas en el conteo acumulado de fotones.

### Efecto del tiempo final de integración de la temperatura acumulada ( $t_0$ ) sobre la determinación del contenido de humedad

Para evaluar cuál es el efecto de considerar distintos tiempos finales de integración de la temperatura acumulada ( $t_0$ ) (Figura 1) sobre la determinación del  $\theta$ , se estudió cómo cambian las métricas de evaluación cuando se seleccionan seis distintos  $t_0$  para una misma experiencia. En este caso, se utilizaron los datos de la experiencia de 20 min de duración, con un intervalo de integración ( $\Delta t$ ) de 150 s, y el nivel freático a 1.20 m de profundidad. En la Tabla 3 se presentan el  $r^2$  y el  $RMSE$  obtenidos para cada tiempo final de integración  $t_0$ . Además, la Tabla 3 muestra los parámetros de ajuste de la curva de calibración  $D\theta S_{20}$ .

**Tabla 3** |  $r^2$  y  $RMSE$  del ajuste de las curvas  $D\theta S_{20}$  en función de  $t_0$ .

$t_0$ (min)	Parámetros de ajuste		$r^2$	RMSE ( $m^3/m^3$ )
	a	b		
10	$1.37 \cdot 10^8$	-2.4723	0.9033	0.0296
15	$3.07 \cdot 10^8$	-2.3528	0.9119	0.0266
20	$4.86 \cdot 10^8$	-2.2747	0.9142	0.0255
25	$3.99 \cdot 10^8$	-2.1817	0.9153	0.0258
30	$2.87 \cdot 10^8$	-2.1093	0.9160	0.0265
35	$2.32 \cdot 10^8$	-2.0617	0.9170	0.0271

En general, mejores resultados se observan cuando  $t_0 = 15$  min, no existiendo una diferencia significativa al aumentar el tiempo de integración. El menor error ocurre cuando  $t_0 = 20$  min, tiempo que coincide con la duración del pulso de calor ( $t_f$ ). Por lo tanto, se recomienda utilizar  $t_0 = t_f$ .

### Efecto de la intensidad de corriente ( $I$ ) sobre la determinación del contenido de humedad

Para evaluar el efecto de la intensidad de corriente ( $I$ ) se aplicaron pulsos de calor de 5 min, con  $t_f = t_0$  y  $\Delta t = 150$  s, después de que la columna fue drenada por gravedad, y con intensidades medias de corriente de 14.6, 18.2 y 22.8 A, correspondientes a potencias eléctricas de 1.7, 2.6 y 4.0 W/m.

La Tabla 4 presenta el  $r^2$  y el  $RMSE$  de cada una de las curvas de calibración  $D\theta S$ , obtenidas de acuerdo a la intensidad de corriente aplicada al cable de fibra óptica. Se demuestra que a mayor intensidad de corriente, mejor es la estimación del  $\theta$ . Por

ejemplo, al aplicar un pulso de calor de 5 min con una intensidad de corriente promedio de 14.6 A se obtiene un  $r^2 = 0.7988$  y un  $RMSE = 0.0443 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Por otro lado, al aplicar un pulso de calor de 5 min con una intensidad de corriente promedio de 22.8 A se obtiene un  $r^2 = 0.8624$  y un  $RMSE = 0.0256 \text{ m}^3/\text{m}^3$ .

**Tabla 4** |  $r^2$  y  $RMSE$  obtenidos del ajuste de las curvas D $\theta$ S en función del porcentaje de corriente aplicado al cable de fibra óptica.

$I$ (A)	Parámetros de ajuste		$r^2$	RMSE ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )
	a	b		
14.6	$2.12 \cdot 10^8$	-3.318	0.7988	0.0443
18.2	$3.15 \cdot 10^9$	-3.5029	0.8134	0.0366
22.8	$2.42 \cdot 10^9$	-3.2341	0.8624	0.0256

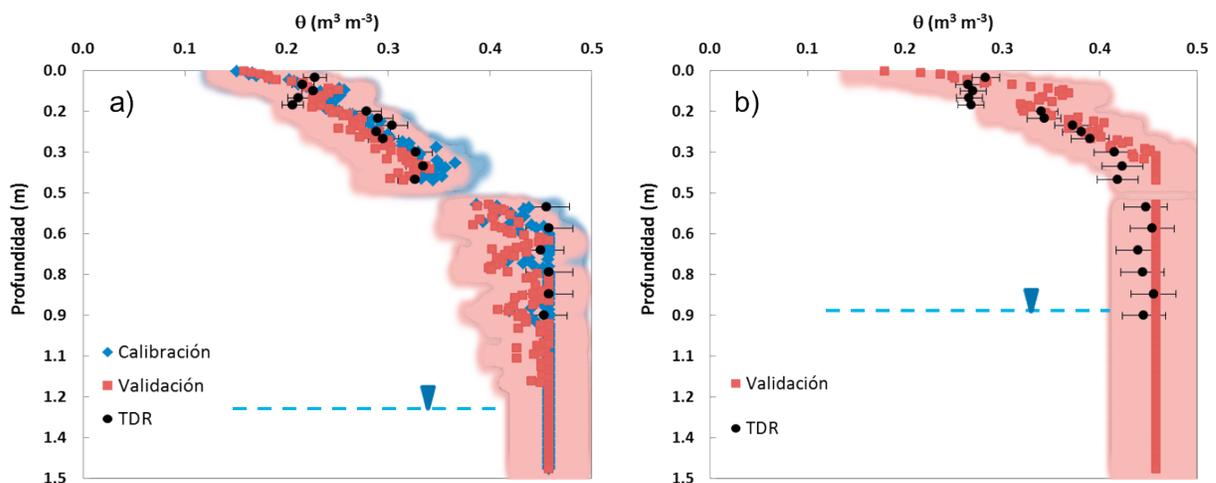
Cuando se hizo circular una intensidad de corriente promedio de 22.8 A se obtuvo un error máximo del orden de  $0.05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Sin embargo, se recomienda usar intensidades menores que ésta (usar  $\sim 17$  A), debido a que cuando se aumenta la intensidad de corriente, el método activo consume más energía, lo que puede ser un desafío cuando se aplica en zonas remotas donde no existe electricidad (Kurth *et al.*, 2013).

## Validación del método activo de determinación distribuida de humedades

La metodología investigada en este trabajo fue validada a través de repeticiones y de una evaluación del método bajo distintas condiciones hidráulicas. Primero, se validó la curva D $\theta$ S $_{20}$  con  $\Delta t = 150$  s y  $t_0 = t_f = 20$  min cuando el nivel freático estaba a 1.20 m de profundidad, tal como se muestra en la Figura 7(a). Luego, se evaluó el desempeño del método activo bajo otras condiciones hidráulicas (Figura 7(b)). En este último caso, la curva de calibración obtenida para un pulso de calor de 20 min con  $\Delta t = 150$  s,  $t_0 = t_f$  y un nivel freático ubicado a 1.20 m de profundidad fue utilizada para estimar el perfil del  $\theta$  cuando el nivel freático se fijó a 0.90 m de profundidad.

La Figura 7(a) presenta los resultados de la validación del método activo bajo las mismas condiciones hidráulicas que las usadas para obtener la curva de calibración que relaciona la temperatura acumulada con el contenido de humedad. En este caso, la curva de calibración está dada por:

$$D\theta S_{20} = 4.8589 \times 10^8 T_{cum}^{-2.2747} \quad (6)$$



**Figura 7** | (a) Validación del método activo en una repetición de la experiencia usada para construir la curva de calibración (D $\theta$ S $_{20}$ ). (b) Validación del método activo para condiciones hidráulicas distintas a las de calibración. La evaluación del método corresponde a una situación donde el nivel freático estaba a 0.90 m de profundidad.

En la Figura 7(a) se observan pequeñas diferencias entre el  $\theta$  estimado al construir la curva de calibración y el  $\theta$  estimado con la experiencia de validación. Estas diferencias se explican pues aunque la duración del pulso de calor y las condiciones hidráulicas fueron las mismas, las fluctuaciones de la corriente eléctrica en torno a la intensidad media pueden haber causado los errores observados ( $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ). De la Figura 7(b) se aprecia que, la predicción del  $\theta$  con el método activo tiende a sobreestimar las humedades medidas por los sensores TDR, con errores del orden de  $0.08 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , que sigue siendo un error aceptable para todo el rango de humedades.

---

## CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó el método activo para determinar el  $\theta$  de un suelo. En este método, un cable de fibra óptica con elementos conductores fue enterrado en el suelo y se aplicaron pulsos de calor a lo largo del cable. Luego, se evaluó la respuesta térmica del cable para correlacionar  $T_{cum}$  y  $\theta$  a través de una relación potencial definida por tramos, donde éstos dependen de las propiedades hidrodinámicas del suelo.

La aplicación de los pulsos de calor permitió obtener cuatro curvas de calibración ( $D\theta S_2$ ,  $D\theta S_5$ ,  $D\theta S_{10}$  y  $D\theta S_{20}$ ), para pulsos con una duración de 2, 5, 10 y 20 min, respectivamente. Estas curvas, que fueron desarrolladas para un nivel freático de 1.2 m de profundidad y una intensidad media de corriente de 16.5, 18.3, 17.2 y 17.5 A (potencias del orden de  $\sim 2\text{-}3 \text{ W/m}$ ), permiten inferir el  $\theta$  a partir de  $T_{cum}$  en cada uno de los segmentos del cable.

Un análisis de sensibilidad permitió encontrar los parámetros óptimos de operación del método activo. Este análisis determinó que la duración óptima del pulso de calor debe ser de  $t_j = 20 \text{ min}$ , donde se obtienen errores máximos del orden de  $0.08 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Por otro lado, se encontró que el intervalo de integración ( $\Delta t$ ) no tiene un mayor efecto sobre la determinación del  $\theta$ , aunque al evaluar el método con  $\Delta t = 150 \text{ s}$  se obtienen los mejores resultados (menores *RMSE*). Además, se encontró que el tiempo óptimo de integración para calcular  $T_{cum}$  ocurre cuando  $t_0$  coincide con la duración del pulso de calor ( $t_j$ ).

La metodología de análisis presentada en este documento puede ser utilizada para determinar los parámetros de operación de otros sistemas que utilicen el método activo para estimar el  $\theta$ , por lo que se recomienda su uso con el fin de evaluar sistemáticamente estos sistemas.

---

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue auspiciado por el Proyecto FONDECYT N°1170850 (CONICYT), y por el Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo del Perú (PRONABEC). Los autores agradecen a C. Sayde y a S. Tyler por sus sugerencias al inicio del trabajo de investigación. F. Suárez agradece el apoyo del Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS-CONICYT/FONDAP/15110020) y del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA-CONICYT/FONDAP/15090013).

---

## REFERENCIAS

- Aufleger, M., Conrad, M., Perzmaier, S., Porras, P. (2005). Improving a fiber optics tool for monitoring leakage. *Hydro Review Worldwide*, 13(4), 18-23.
- Benítez-Buelga, J., Rodríguez-Sinobas, L., Sánchez-Calvo, R., Gil-Rodríguez, M., Sayde, C., Selker, J.S. (2016). Calibration of soil moisture sensing with subsurface heated fiber optics using numerical simulation. *Water Resources Research*, 52, 2985-2995. <https://doi.org/10.1002/2015WR017897>
- Bennett, N. D., Croke, B. F., Guariso, G., Guillaume, J. H., Hamilton, S. H., Jakeman, A. J., Andreassian, V. (2013). Characterising performance of environmental models. *Environmental Modelling & Software*, 40, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.011>

- Black, C. A., Evans, D. D., Dinauer, R. C. (1965). *Methods of soil analysis*. 9, 653-708. Madison, WI: American Society of Agronomy.
- Cao, D., Shi, B., Zhu, H., Wei, G., Chen, S., Yan, J. (2015). A distributed measurement method for in-situ soil moisture content by using carbon-fiber heated cable. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7, 700-707. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.08.003>
- Ciocca, F., Luna, I., van de Giesen, N., Parlange, M. B. (2012). Heated optical fiber for distributed soil-moisture measurements: A lysimeter experiment. *Vadose Zone Journal*, 11, 1-10. <https://doi.org/10.2136/vzj2011.0177>
- Cristi, F., Fierro, V., Suárez, F., Muñoz, J.F., Hausner, M.B. (2016). A TDR-waveform approach to estimate soil water content in electrically conductive soils. *Computers and Electronics in Agriculture*, 121, 160-168. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.12.004>
- Dong, J., Steele-Dunne, S. C., Ochsner, T. E., van de Giesen, N. (2016). Estimating soil moisture and soil thermal and hydraulic properties by assimilating soil temperatures using a particle batch smoother. *Advances in Water Resources*, 91, 104-116. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.03.008>
- Entekhabi, D., Rodriguez-Iturbe, I., Castelli, F. (1996). Mutualinteraction of soil moisture state and atmospheric processes. *Journal of Hydrology*, 184:3-17. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02965-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02965-6)
- 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>
- Klute, A. (1994). *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods. Agronomy Series, vol. 9.* American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
- Kurth, A.M., Dawes, N., Selker, J., Schirmer, M. (2013). Autonomous distributed temperature sensing for long-term heated applications in remote areas. *Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems*, 2, 71-77. <https://doi.org/10.5194/gi-2-71-2013>
- 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. *Ingeniería del agua*, 20(2), 103-114. <https://doi.org/10.4995/ia.2016.4450>
- Perzlaier, S., Straßer, K. H., Strobl, T., Aufleger, M. (2006). Integral seepage monitoring on open channel embankment dams by the DFOT heat pulse method. *22nd ICOLD*, Barcelona, Spain.
- Peters, A., Durner, W. (2008). Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties. *Journal of Hydrology*, 356(1), 147-162. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.04.016>
- Rowell, D. L. (2014). *Soil science: Methods & applications*. Routledge.
- Sayde, C., Gregory, C., Gil-Rodríguez, M., Tuffillaro, N., Tyler, S., van de Giesen, N., y Selker, J. S. (2010). "Feasibility of soil moisture monitoring with heated fiber optics". *Water Resources Research*, 46(6). <https://doi.org/10.1029/2009WR007846>
- Sayde, C., Buelga, J. B., Rodríguez-Sinobas, L., Khoury, L. E., 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. <https://doi.org/10.1002/2013WR014983>
- Selker, J.S., Thevenaz, L., Huwald, H., Mallet, A., Luxemburg, W., van de Giesen, N.C., Stejskal, M., Zeman, J., Westhoff, M., Parlange, M.B. (2006). Distributed fiberoptic temperature sensing for hydrologic systems. *Water Resources Research*, 42, W12202, 8. <https://doi.org/10.1029/2006WR005326>
- Soil Survey Staff. (2014). *Keys to Soil Taxonomy*, 12<sup>th</sup> ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Steele-Dunne, S.C., Rutten, M.M., Krzeminska, D.M., Hausner, M.B., Tyler, S.W., Selker, J.S., Bogaard, T.A., van de Giesen, N.C. (2010). Feasibility of soil moisture estimation using passive distributed temperature sensing. *Water Resources Research*, 46, W03534. <https://doi.org/10.1029/2009WR008272>

Striegl, A. M., Loheide, I. I., Steven, P. (2012). Heated distributed temperature sensing for field scale soil moisture monitoring. *Groundwater*, 50(3), 340-347. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.00928.x>

Suárez, F., Aravena, J.E., Hausner, M.B., Childress, A.E., Tyler, S.W. (2011). Assessment of a vertical high-resolution distributed-temperature-sensing system in a shallow thermohaline environment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 1081-1093. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1081-2011>

Tyler, S.W., Selker, J.S., Hausner, M.B., Hatch, C.E., Torgersen, T., Thodal, C.E., Schladow, S.G. (2009). Environmental temperature sensing using Raman spectra DTS fiber-optic methods. *Water Resources Research*, 45, W00D23. <https://doi.org/10.1029/2008WR007052>

Weiss, J. D. (2003). Using fiber optics to detect moisture intrusion into a landfill cap consisting of a vegetative soil barrier. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 53, 1130-1148. <https://doi.org/10.1080/10473289.2003.10466268>

van Genuchten, M.T. (1980). A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>