

Medición simultánea de propiedades termofísicas de suelos para la instalación de bombas de calor geotérmico

Pablo García Manuel¹, Vicente Torres Luna¹, Abel Hernández Ochoa¹, Fernando Rivas Cruz¹, Ismael González Reyes¹, Juan Ignacio Martínez Estrella¹, Alfonso García-Gutiérrez¹, Abelardo Mercado Herrera², Fernando Lara Chávez², Juan Carlos Ling López²

¹Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Cuernavaca, Mor., México. Correo: pgarcia@iie.org.mx. ²Universidad Politécnica de Baja California, Mexicali, BC, México. Correo: amercadoh@upbc.edu.mx.

RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología para la determinación simultánea de dos propiedades termofísicas de rocas, con énfasis en la aplicación de mediciones en sitio, destinados para la instalación de Bombas de Calor Geotérmicas (BCG). Las propiedades que se pueden determinar con esta metodología son la conductividad térmica y la difusividad térmica de rocas con características de semiconductores térmicos. Los rangos medidos en muestras cilíndricas de rocas oscilan entre 0.4 y 5 W/m°C para la conductividad térmica, mientras que para la difusividad térmica los valores medidos van de 1×10^{-7} m²/s a 1×10^{-6} m²/s, en los cuales se ha encontrado buena reproducibilidad. La instrumentación utilizada para las mediciones está compuesta por una computadora laptop, un adquisidor de datos, una fuente de corriente constante, termopares, calentadores y dispositivos auxiliares para la medición en laboratorio, así como para la medición en campo, con la principal ventaja de que solo se requiere energía alterna para el funcionamiento de los dispositivos. Se efectuaron calibraciones del instrumento de medición con una barra fundida de cuarzo, de la cual se conocen sus propiedades termofísicas. Se encontraron variaciones de 1.5% entre los valores reportados por el proveedor del cuarzo para la conductividad térmica, mientras que para la difusividad térmica se encontraron variaciones del 4.8% comparadas con las mediciones realizadas con el equipo presentado en este trabajo. A la fecha se han realizado diversas mediciones en materiales cilíndricos de diferentes composiciones, así como también se ha aplicado la metodología de medición en dos sitios donde se instalarán bombas de calor geotérmico, actividades enmarcadas en el proyecto P13 del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIEGeo).

Palabras clave: Conductividad térmica, difusividad térmica, mediciones en campo, medición en laboratorio, metodología.

Simultaneous measurement of soil thermophysical properties for installing geothermal heat pumps

ABSTRACT

This paper presents a methodology for the simultaneous determination of two thermophysical properties of rocks, with emphasis on the application on field measurements, focused on the installation of Geothermal Heat Pumps (GHP). The properties that can be determined with this methodology are thermal conductivity and thermal diffusivity of rocks with characteristics of thermal semiconductors. The measured ranges in cylindrical rock samples ranged from 0.4 to 5 W/m°C for thermal conductivity, whereas for thermal diffusivity the measured values ranged from 1×10^{-7} m²/s to 1×10^{-6} m²/s, in which good repeatability has been found. The instrumentation used for measurements consists of a laptop computer, a data acquisition device, a constant current source, thermocouples, heaters and auxiliary devices for laboratory measurement, as well as field measurement, with the main advantage that only alternate current is required for the operation of the devices. Calibrations of the measuring instrument

were carried out with a fused quartz bar whose thermophysical properties are known. Variations of 1.5% were found between the values reported by the quartz supplier for thermal conductivity, whereas for thermal diffusivity variations of 4.8% were found, compared to the measurements made with the equipment presented in this paper. To this day, various measurements have been made on cylindrical materials of different compositions, and the measurement methodology has been applied in two sites where geothermal heat pumps will be installed, activities framed in the P13 project of the Mexican Center for Innovation in Geothermal Energy (CeMIE-Geo).

Keywords: Thermal conductivity, thermal diffusivity, field measurements, laboratory measurement, methodology.

1. Introducción

En el laboratorio de yacimientos de la Gerencia de Geotermia del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) se cuenta con una metodología para medir propiedades termofísicas de suelos y de núcleos de roca. En este trabajo se presenta la descripción del método de medición para realizar la cuantificación de dos propiedades termofísicas de vital importancia para la simulación numérica de yacimientos, así como para el diseño de intercambiadores de calor subterráneos de las bombas de calor geotérmico (BCG). En el caso de la simulación numérica, el valor de la conductividad térmica se utiliza para predecir el flujo de calor de un yacimiento geotérmico cuando se conoce el gradiente de temperatura del mismo. En el caso de las BCG, el valor de la conductividad térmica en conjunto con la capacidad de la bomba de calor, definen el tamaño del circuito del intercambiador que será enterrado en el subsuelo. Por estas razones es importante conocer con la mejor exactitud el valor de ambas propiedades termofísicas.

En este trabajo se describe el proceso de calibración del equipo de medición, ilustrado con fotografías y gráficas de la respuesta del cuarzo durante un proceso de medición.

Por otra parte, se muestra la aplicación de la metodología en mediciones en campo y se ilustra mediante figuras el proceso de disipación del frente de calor durante varios eventos en suelos homogéneos, en los cuales se aprecia el desarrollo suave y similar de conducción de calor, lo que garantizó la medición óptima del sitio.

2. Descripción del método

Existen diversos métodos para la determinación de la conductividad térmica y la difusividad térmica de materiales, suelos y de rocas en general. El equipo de placa caliente con guarda (Lira et al., 2008) tiene aplicaciones en muestras aislantes y predispone el método a una muestra de tamaño grande, las mediciones se realizan en laboratorio y su principio está basado en el estado permanente. Otro método más aplicable a suelos de origen geotérmico es el método de la aguja de calor, o '*heat needle*', desarrollado por Beardsmore y Antriasian (2015). Este es un instrumento sofisticado con sensores de gran exactitud, pero con alcance de 0.10 m a 1.10 m de profundidad, con registros transitorios de temperatura y tiempo a cada 0.2 m, cuyo objetivo real es definir flujo de calor somero pero que para hacerlo debe medir la conductividad térmica *in situ* y calcular la difusividad térmica. Por otra parte, se asume que el costo de este instrumento es elevado, debido a la instrumentación que utiliza. Existen en el mercado instrumentos manuales para la medición de la conductividad térmica y también para la difusividad térmica, pero estos dispositivos solo sirven para aplicaciones muy específicas, debido a su gran incertidumbre. Decagon Devices es una marca que provee esos últimos dispositivos.

El método presentado en este trabajo es el de la fuente lineal de calor y determina en forma simultánea

la conductividad térmica y la difusividad térmica. El método está basado en régimen transitorio, para un medio continuo e isotrópico, que además tiene la ventaja de ser un equipo portátil y de bajo costo.

El proceso de calibración y medición de propiedades termofísicas se explica en el informe de Torres Luna et al., (2016) y para mayor detalle en el trabajo Contreras y García (1990). La calibración del equipo y el proceso de medición mismo, requieren de la integración del equipo experimental ilustrado en la Figura 1 (todas las figuras al final del texto). En el proceso de calibración se utiliza una barra de cuarzo fundido con propiedades conocidas, mientras que en el proceso de medición se sustituye esta barra por el material que se desea medir, que puede ser una muestra de roca, una porción de material a medir o el suelo en el sitio de interés.

En la Figura 1 se muestran los componentes del equipo experimental, formado por una computadora Laptop, un adquisidor de datos con tarjeta de registro de temperaturas, una fuente de corriente constante y el material a medir. En este caso es una muestra cilíndrica de cuarzo con un calentador instalado a lo largo de su centro y dos termopares tipo K alojados en el interior de la muestra de cuarzo de forma concéntrica.

El proceso de calibración se efectuó con el objetivo de garantizar que las mediciones del equipo de medición reproduzcan las propiedades termofísicas del cuarzo. Durante este proceso, se programó la fuente en el modo de corriente constante para suministrar una intensidad de corriente directa capaz de calentar a la barra de cuarzo. Por otra parte, se registran los incrementos de temperatura en la barra de cuarzo, mediante dos termopares tipo K, los cuales están interconectados en un adquisidor de datos controlado por la computadora.

El programa del adquisidor de datos presenta en tiempo real el comportamiento del frente de calor, mediante el registro en pantalla de los valores de temperatura de los termopares. Uno de ellos, denominado termopar de medición, se encuentra a una distancia ‘a’ del calentador central, tal y como se puede ver en la Figura 1. El otro termopar, denominado termopar de observación, se encuentra instalado en la parte externa del cuarzo, y se utiliza para indicar el tiempo en el cual el frente de calor llega al extremo de la barra de cuarzo.

En la Figura 2 se muestra un ejemplo de medición de las propiedades del cuarzo, donde se aprecia el movimiento del frente de calor durante la medición de las propiedades termofísicas. El software del adquisidor de datos permite guardar la información generada en un archivo de datos en formato de texto, mismo que es exportado al programa Excel para su análisis y cálculo de las propiedades termofísicas.

Los proveedores de la barra de cuarzo proporcionaron un valor de conductividad térmica de 1.38 W/m°C y un valor de difusividad térmica de 8.51×10^{-7} W/m°C. Los valores obtenidos durante el proceso de calibración variaron únicamente en un 1.5% para la conductividad térmica, mientras que en la difusividad se encontraron diferencias de 4.8%, tal y como se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1 Resultados de la calibración del equipo experimental.

Propiedad	Valores medidos	Valores del fabricante	% de diferencia
Difusividad térmica (m ² /s)	8.10×10^{-7}	8.51×10^{-7}	4.8%
Conductividad Térmica (W/m°C)	1.36	1.38	1.5%

3. Aplicación del método en sitios seleccionados

El proceso de medición en campo se realizó con éxito en dos trincheras exploratorias en las cuales se instalarán intercambiadores de calor para Bombas de Calor Geotérmico. La primera medición se efectuó en el Jardín de Niños del poblado de Los Humeros, Puebla, donde se acondicionarán tres espacios: el Jardín de Niños, una Clínica del IMSS y el Centro de Atención Rural al Adolescente. La segunda medición de propiedades termofísicas se realizó en las instalaciones de la Universidad Politécnica de Baja California (UPBC), con la finalidad de acondicionar cinco laboratorios pertenecientes al área de ingeniería.

En la Figura 3 se muestra el proceso de medición en sitio durante la caracterización termofísica de una trinchera exploratoria del Jardín de Niños, en el poblado de Los Humeros, Puebla.

En la Figura 4 se presentan tres eventos de medición en sitio, en los cuales se determinaron la conductividad térmica y la difusividad térmica del suelo. En esta figura se observan tres eventos distintos de medición, donde se representa la temperatura de medición con diferentes valores de temperatura inicial. El frente de calor de cada evento tiene un desarrollo suave, uniforme y no lineal, similar al obtenido en el proceso de calibración de la Figura 2.

Los valores medidos a la fecha han variado en un amplio rango, debido a que se han medido diferentes tipos como material arenoso seco, arenoso húmedo, arcilla hidratada y deshidratada, todos pertenecientes a los sitios en los cuales se instalarán las BCG. También se han medido propiedades termofísicas en núcleos de roca homogéneos y heterogéneos de diferente mineralogía. Los valores obtenidos en núcleos de roca a la fecha varían entre $0.5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ y $5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Se ha encontrado buena reproducibilidad en las mediciones, tanto en los sitios de instalación de las BCG, como en las pruebas en núcleos efectuadas en laboratorio.

Referencias

- Conterras, E., y A. García, 1990. Implementación de un método experimental para determinar simultáneamente la conductividad térmica, la difusividad térmica y el calor específico de rocas aplicando teoría de la fuente lineal en un medio infinito. Instituto de Investigaciones Eléctricas, Informe IIE/11/2389/I 03/P. Inédito.
- Beardmore, G.R., and A. Antriasian, 2015. Developing the ‘Heat Needle’ – A Tool for Cost Effective Heat Flow Mapping. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
- Lira-Cortés, L., O.J. González Rodríguez, y E. Méndez-Lango, 2008. Medición de la Conductividad Térmica de Algunos Materiales Utilizados en Edificaciones. *Memorias del Simposio de Metrología 2008*, Santiago de Querétaro, México, 22 al 24 de Octubre de 2008.
- Torres Luna, V. et al., 2016. Informe de la etapa 2. Proyecto 13: Análisis de factibilidad, comparación de tecnologías, estudio de mercado y desarrollo de un proyecto demostrativo de Bombas de Calor Geotérmico para acondicionamiento de espacios habitacionales y comerciales en las regiones Centro y Norte de México. CeMIE-Geo. Inédito.

FIGURAS EN LAS PÁGINAS SIGUIENTES



Figura 1. Arreglo experimental para realizar la calibración y mediciones de propiedades termofísicas. En el modo de calibración se utiliza la barra de cuarzo fundido, mientras que en el proceso de medición se utiliza el material que se desea medir.

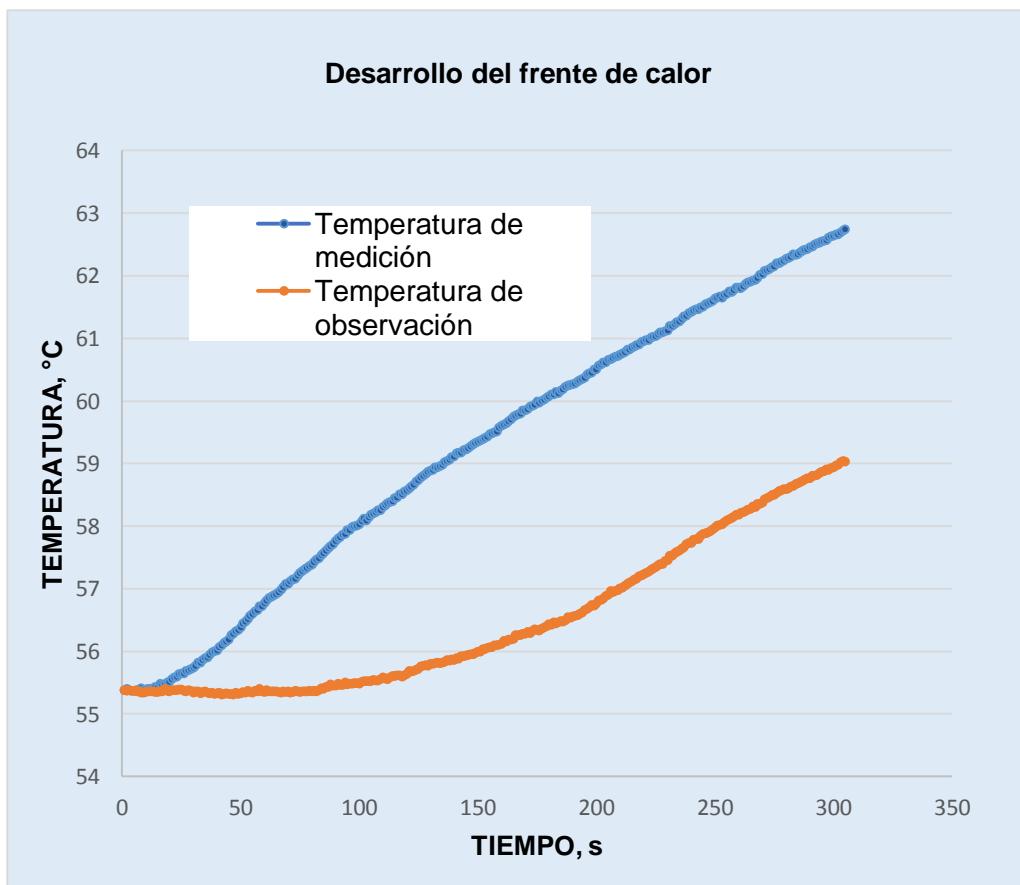


Figura 2. Desarrollo del frente de calor durante un evento de calibración en una barra de cuarzo.



Figura 3. Proceso de medición de propiedades termofísicas en campo.

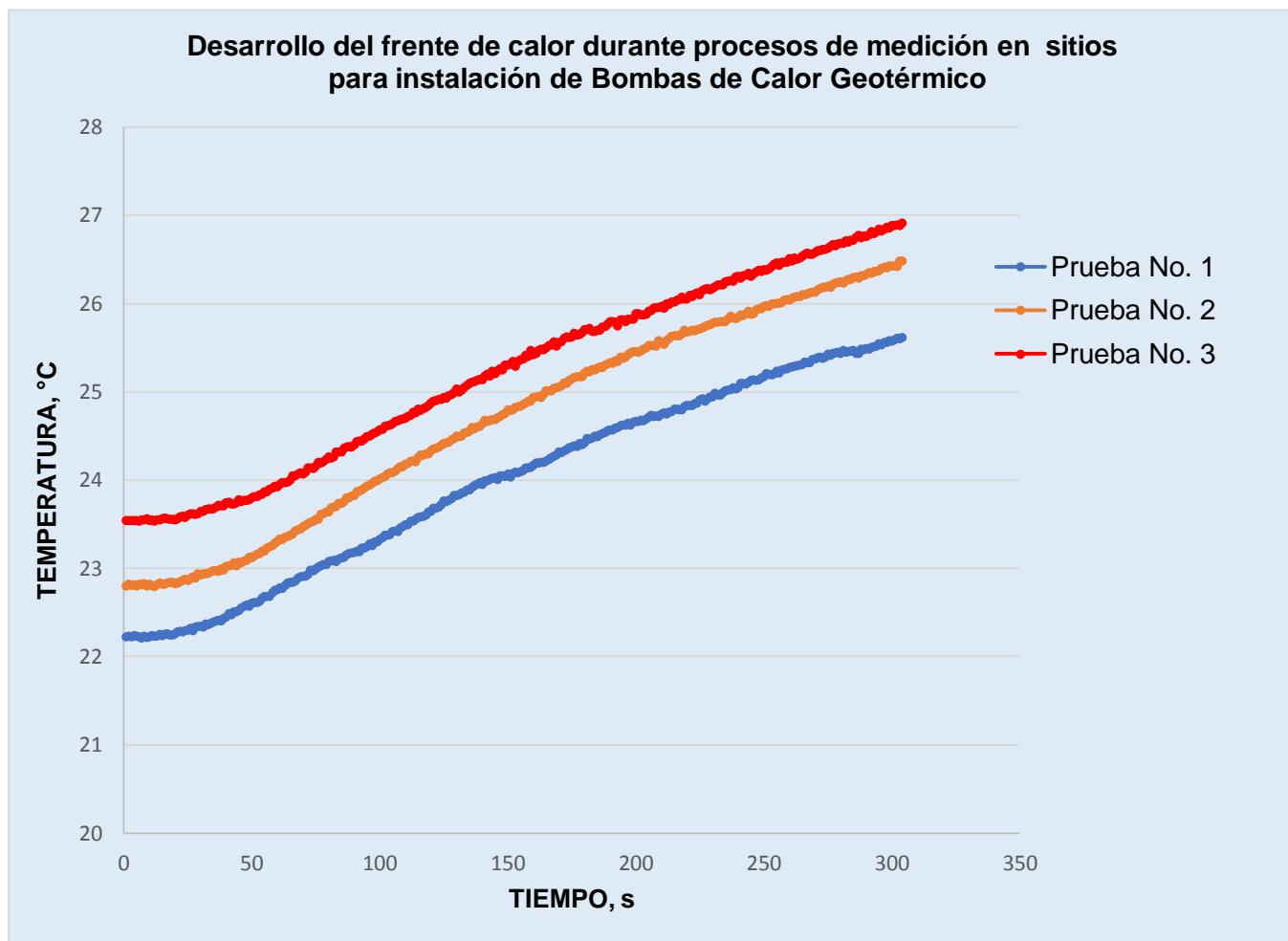


Figura 4. Desarrollo del frente de calor en tres eventos de medición en campo.