

Determinación experimental In Situ de la difusividad aparente del suelo por desfase de onda térmica

SILVA-AGUILAR, Oscar Fernando[†], ANDAVERDE-ARREDONDO, Jorge Alberto, BENÍTEZ-FUNDORA, Artemio Jesús y ESCOBEDO-TRUJILLO, Beatris Adriana

*Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma De México
'Universidad Veracruzana, Campus Coatzacoalcos, Veracruz*

Recibido 10 de Julio, 2017; Aceptado 2 de Septiembre, 2017

Resumen

Este trabajo presenta la aplicación de una nueva metodología para la determinación experimental *in situ* de la difusividad térmica aparente (α) del suelo por desfase de onda térmica. En el diseño de bombas de calor e intercambiadores geotérmicos utilizados en tecnologías de energía renovables se requiere el valor de α del suelo para el cálculo del gradiente geotérmico y el calor a transferir entre el fluido y el suelo. Se realizaron corridas experimentales en el campus Coatzacoalcos de la Universidad Veracruzana (México), mediante una sonda de medición instrumentada con termopares cobre-constantán, distribuidos verticalmente de 0 hasta 1m para medir la variación cíclica de la temperatura del suelo. Con estos datos se calcula el espesor vertical del suelo (z) en que la temperatura se desfasa un periodo completo. Conocido el valor de z , la difusividad es calculada utilizando la ecuación diferencial de conducción unidireccional, en un cilindro semi-infinito con fuente de calor variable. La contribución de la metodología propuesta es una innovación al aplicar la propagación de error para obtener valores confiables de difusividad térmica *in situ*, utilizando la radiación solar en la superficie del suelo como fuente del calor cíclica. Los valores de α obtenidos se encuentran en los intervalos reportados para suelos arenosos.

Energía geotérmica, transferencia de calor, propagación de error, propiedades termofísicas

Abstract

This paper presents the implementation of a new methodology for the experimental determination *in situ* thermal diffusivity (α) of soil by thermal wave gap. Design of heat pumps and geothermal heat exchangers used in renewable energy technologies requires the value of α in the soil for the calculation of the geothermal gradient and heat transfer between the fluid and the soil. The experiments was done on campus Coatzacoalcos at the Universidad Veracruzana (Mexico), these experiments user a measuring probe instrumented with copper-constantan thermocouples, distributed vertically at from 0 up to 1m for measure the cyclic variation of soil temperature. This measures obtained of the experiments allows us calculated the vertical thickness of the soil (z) in which the temperature offset a period. Known the value of z , the diffusivity is calculated using the one-way conduction differential equation, in a semi-infinite cylinder with variable heat source. The contribution of the proposed methodology is an innovation by applying the error propagation to obtain reliable values of thermal diffusivity *in situ*, uses the solar radiation at the surface of the soil as cyclic heat supply. The obtained values of α are intervals reported for sandy soils.

Geothermal energy, heat transfer, propagation of error, thermophysical properties

Citación: SILVA-AGUILAR, Oscar Fernando, ANDAVERDE-ARREDONDO, Jorge Alberto, BENÍTEZ-FUNDORA, Artemio Jesús y ESCOBEDO-TRUJILLO, Beatris Adriana. Determinación experimental In Situ de la difusividad aparente del suelo por desfase de onda térmica. Revista de Ingeniería Tecnológica 2017. 1-3:46-57

[†] Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El conocimiento de las propiedades termofísicas del subsuelo es de suma importancia en aplicaciones de ingeniería e investigación de energías renovables. Las propiedades del subsuelo que determinan la respuesta a los cambios de temperatura son: el calor específico volumétrico C_v ($J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$), la conductividad térmica K ($Wm^{-1}\ ^\circ C^{-1}$) y la difusividad térmica α ($m^2\ s^{-1}$). Dichas propiedades están en función de los componentes geoquímicos (minerales), porosidad y el contenido de agua, por lo que la variación de la difusividad a las condiciones específicas de cada lugar, tiempo y profundidad representa un problema a resolver.

En el campo de la Geotermia, las propiedades termofísicas del suelo así como las condiciones meteorológicas, son cruciales en el cálculo y simulación del flujo del calor hacia y desde el subsuelo, para el diseño de intercambiadores geotérmicos y bombas de calor frecuentemente utilizadas en acondicionamiento de confort humano. Estas propiedades también son importantes en lo que se refiere a edafología, ya que en las capas superficiales del suelo tienen lugar importantes procesos, por ejemplo la difusión gaseosa la germinación de semillas y la disponibilidad de nutrientes, fuertemente relacionados con la difusividad térmica (López-Santos et al., 2014). Es sabido que capas de tierra con baja conductividad y difusividad térmica dan como resultado un mayor gradiente geotérmico y viceversa (Pouloupatis et al., 2011). Por otra parte, la difusividad, la conductividad térmica y la capacidad calorífica del suelo son altamente dependientes de su contenido de humedad. Cuanto más grande es el contenido en agua, mayor serán sus valores. Se observa que la conductividad térmica del suelo es la propiedad más influyente en los resultados de transferencia de calor en el subsuelo (Demir et al., 2009; Florides y Kalogirou, 2004).

En el presente trabajo se expone una metodología para la determinación in situ de la difusividad térmica α , utilizando el concepto de onda térmica, basado en la propuesta original de Angström de someter un espécimen o muestra a periódicas variaciones de temperatura, donde un extremo es calentado y el extremo opuesto es enfriado en tanto se efectúan mediciones de temperaturas locales a diferentes distancias a lo largo del eje de la muestra (Bodzenta, 2008).

Varias técnicas han sido desarrolladas para la determinación y la evaluación de propiedades térmicas, las técnicas de medición de difusividad térmica, se pueden clasificar en técnicas de laboratorio y técnicas *in situ*. La determinación de difusividad por técnicas de laboratorio requiere generalmente, equipos costosos (Gillies et al., 1991), la preparación de especímenes para prueba (Abu-Hamdeh, 2016), frecuentemente los especímenes en forma de disco o de barra, con dimensiones y acabados sólo obtenidos con equipo y herramientas especializadas como el método TRAC (Thermal Radiation Calorimetry) (Hisano et al, 1999), y la técnica de radiometría fototérmica (Martinsons et al., 2002).

Las técnicas *in situ* han sido desarrolladas con el objetivo de efectuar las mediciones en campo y sin requerir la elaboración de especímenes. Los métodos más conocidos son: el denominado REKA (Rapid Evaluation of K and Alpha) de Danko y Mousset-Jones (Danko et al, 2002), la Prueba de Respuesta térmica (TRT), que se ha utilizado como método muy efectivo para determinar la conductividad y difusividad térmica de la tierra (Ozgener, 2011). Otros métodos evaluados para determinar la difusividad aparente α a partir de dos conjuntos de datos con algoritmos de amplitud, fase, arcotangente, logarítmico, armónico y conducción-convección.

Estos métodos aportaron resultados diversos entre sí (Gao et al., 2009; Horton et al., 1983). Una característica común en las técnicas *in situ*, es la inserción de elementos de temperatura conocida (estímulo térmico) y la observación del cambio de la misma con respecto al tiempo, con o sin un fluido de por medio.

El método que se propone utiliza la variación cíclica de las condiciones climatológicas diurnas y estacionales, por lo que no se emplea un estímulo térmico artificial, ni fluido intermedio es la determinación de la difusividad. El método ofrece la ventaja de mantener la mínima perturbación posible a las condiciones naturales del suelo. Además se aplica a los resultados una evaluación de confiabilidad mediante reglas estadísticas de propagación de errores. El objetivo de este trabajo es mostrar que el método experimental *in situ* de la difusividad aparente del suelo por desfase de onda térmica con las características que se propone, aporta resultados de considerable confiabilidad de la difusividad térmica del suelo, equivalentes a valores publicados en la literatura, con una notable ventaja en costos y equipo utilizado por otros métodos de laboratorio.

Equipo y procedimiento

Para realizar la experimentación es requerida la previa perforación de un pozo en el subsuelo, el procedimiento de perforación debe de tener en consideración la mínima alteración posible de las condiciones naturales del suelo, evitando la compactación del suelo, por lo que se utiliza un proceso de corte mediante broca de perforación fabricada especialmente para tal efecto, el diámetro de la broca es ajustada a los requerimientos geométricos de la sonda de medición, para asegurar el íntimo contacto entre los sensores de temperatura y el subsuelo de la zona de medición.

Se utilizaron sensores termopares tipo T Cobre – Constantán para un intervalo de temperaturas de 0 a 350 °C, con una exactitud de ± 0.5 °C calibrados con un equipo AMETEK modelo CTC-140 a rango de -30 °C a 140 °C, con un error de calibración del orden de ± 0.02 °C; la captura de datos se realizó mediante un adquirente de Agilent modelo 34972A.

En la Figura 1 se presenta el esquema de la sonda de medición con sensores de temperatura localizados a profundidades de 0.0, 0.16, 0.25, 0.36, 0.49, 0.64, 0.81 y 1.00 m, donde se aprecia el contacto directo de los sensores con el material del suelo.

La ubicación de los sensores en la sonda en intervalos crecientes con la profundidad, obedece a que en la parte somera debe de registrarse con mayor detalle las temperaturas por ser la zona donde la variación diurna es más evidente. La ubicación de los sensores es comparable a la distribución reportada por López-Santos et al. (2014). Los sensores (termopares) se colocaron cuidando que la distancia entre ellos fuera la indicada, además que los termopares fueran rígidos pero de diámetro reducido. La sonda se construyó de PVC dado que es un material de baja conductividad térmica, para que el proceso de transferencia de calor se diera por el material del suelo y no por la sonda misma. Por último, el diámetro del pozo y por lo tanto de la sonda son reducidos (0.06 m) a fin de que no provoquen ruido térmico significativo al interior del subsuelo.

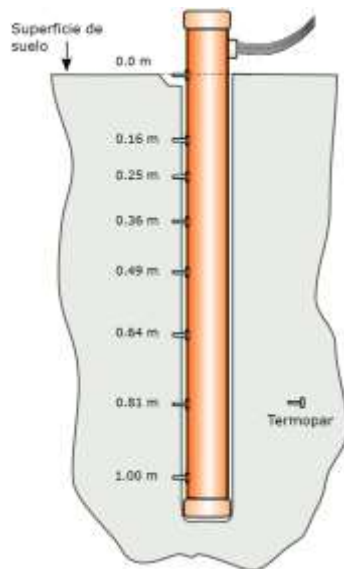


Figura 1 Distribución de termopares en sonda de medición

En la Figura 2 se muestra el prototipo de la sonda de medición con las características mencionada ya instalada en el lugar de medición de temperaturas.



Figura 2 Sonda de medición instalada

La sonda de medición se instaló en el campus Coatzacoalcos de la Universidad Veracruzana de coordenadas latitud $18^{\circ}08'39''$ N, longitud oeste $94^{\circ}28'36''$ y altitud 10 msnm localizada en la zona costera del Golfo de México, ubicación que se muestra en la Figura 3.



Figura 3 Ubicación geográfica de experimentación

Metodología

La presente sección describe la metodología empleada para determinar *in situ* la difusividad térmica del suelo.

La metodología consiste en realizar los siguientes pasos:

- (a) Mediante la sonda de medición obtener la variación de la temperatura del suelo en tiempo y profundidad.
- (b) Calcular el espesor vertical del suelo (z) en que la temperatura se desfasa un periodo completo.
- (c) Conocida z , la difusividad se calcula utilizando la ecuación diferencial de conducción unidireccional de Fourier.
- (d) Hacer un análisis de error de la regresión lineal y la propagación de error de la difusividad obtenida, causada por la incertidumbre o errores en las mediciones de desfase hasta z . Lo anterior permitirá encontrar intervalos de confianza que describirán la región dentro de la cual pudiera encontrarse el valor real de la difusividad.

Ya que existen diversos métodos para la determinación de la difusividad, del método armónico de desfase de onda mencionado en Horton et al., (1983), se decide en este trabajo utilizar la ecuación de difusividad por desfase de onda térmica propuesta por Beardsmore y Cull (2001). A continuación se presenta en forma sintética el fundamento térmico y matemático de la misma.

Se considera que la conducción de calor evoluciona de acuerdo a la ecuación diferencial de Fourier, Ec. (1):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \alpha \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

donde ∂T es la variación de la temperatura (K), ∂z la variación de la distancia (m) en este caso vertical, α la difusividad térmica ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) y ∂t la variación en el tiempo (s).

El uso de la ecuación diferencial de Fourier (1) se debe a que el mecanismo de transferencia de calor en el suelo es fundamentalmente de conducción, los mecanismos de convección y radiación se omiten por considerar que en el suelo bajo estudio no existen movimientos sustanciales de gases o líquidos y la radiación en el subsuelo es prácticamente inexistente. El flujo de calor unidireccional por considerar los planos paralelos a la superficie del suelo como isotermas, se considera un medio homogéneo, flujo de calor en un cilindro semi-infinito en estado transitorio y sin generación de calor.

La solución analítica de la ecuación diferencial (1) tomando los efectos de la variación periódica de la temperatura fue propuesta por Carslaw y Jaeger (1989) y está dada por la Ec. 2:

$$T_U = T_S \times \exp(-\varepsilon z) \text{sen}(\omega t - \varepsilon z) \quad (2)$$

donde T_U es la amplitud de temperaturas a una particular profundidad ($^{\circ}\text{C}$), T_S la amplitud de temperaturas en superficie ($^{\circ}\text{C}$) (condición de frontera), ω la frecuencia (s^{-1}) y z la profundidad (m) (no necesariamente en la superficie del suelo). El término ε es función del periodo P (s) y la difusividad, y se calcula mediante la Ec. 3.

$$\varepsilon = \left(\frac{\pi}{P\alpha} \right)^{1/2} \quad (3)$$

Como mencionan los autores Carslaw y Jaeger (1989), la profundidad z en la cual la fluctuación de la temperatura se encuentra en fase con el ciclo de la superficie lo da el término de la función seno en (2), esto es, bajo la condición de que $\varepsilon z = 2\pi$. Así, esta última igualdad junto con la Ec. (3) implican que;

$$z = (4\pi P\alpha)^{1/2} \quad (4)$$

Para calcular el valor de la difusividad térmica del subsuelo se despeja α de la Ec. (4) y se obtiene como resultado la expresión para la difusividad térmica (Ec. 5).

$$\alpha = \frac{z^2}{4\pi P} \quad (5)$$

Espesor vertical del suelo (z)

En esta sección se aproximará usando regresión lineal el espesor vertical del suelo (z) en la cual la fluctuación de la temperatura se encuentra en fase con el ciclo de la superficie, para ello se usará el método de ecuación de fase propuesto por Horton et al., 1983; Persaud y Chang, 1985; Rejeev y Kodikara, 2015.

Para esta finalidad las corridas experimentales permiten obtener la variación de temperatura en cada uno de los puntos de medición.

Se llevó a cabo una campaña experimental, con corridas promedio de 4 días y una frecuencia de medición de temperatura de 15 segundos, simultáneamente a cada una de las profundidades de los termopares de la sonda. En el Gráfico 1, se presenta la variación de la temperatura en cada uno de los puntos de medición.

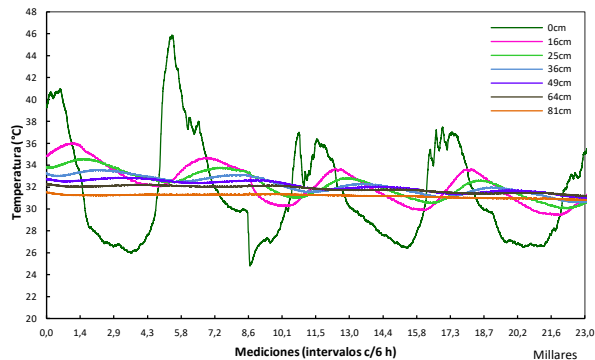


Gráfico 1 Variación de temperatura en tiempo y profundidad

A la profundidad experimental del presente estudio el comportamiento de la temperatura observado durante la medición a diferentes profundidades del suelo, posee cuatro características importantes;

- (a) La variación en el tiempo de la temperatura en todos y cada uno de los puntos de medición es de tipo sinusoidal y tienen en común la misma longitud de onda.

- (b) En una medición simultánea (sin variación del tiempo) existe una disminución en el gradiente de temperatura a medida que se incrementa la profundidad (menor diferencia de temperatura por unidad de longitud vertical de suelo)

- (c) La medición en el tiempo por cada termopar, presenta una disminución de la amplitud de onda térmica (la mitad del intervalo entre cresta y valle) a medida que se incrementa la profundidad del punto de medición.

- (d) La fase de la onda térmica correspondiente a cada termopar, se retrasa (desfasa) en el tiempo a medida que se incrementa la profundidad del punto de medición, debido al tiempo que tarda la onda térmica en recorrer una capa de suelo.

Es precisamente la característica (d) de retraso en tiempo de la onda térmica a medida que se incrementa la profundidad de medición, lo cual constituye el fundamento físico del presente trabajo de desfase de onda térmica.

Periodo-profundidad de onda térmica.

Uno de los métodos usados frecuentemente para calcular la difusividad térmica del suelo es el de ecuación de fase (Horton et al., 1983; Persaud y Chang, 1985; Rejeev y Kodikara, 2015). En estos trabajos se calcula la difusividad térmica a partir del registro de los tiempos de dos máximos de temperatura en dos profundidades diferentes. Este método, aunque sencillo de aplicar, tiene la desventaja de que la incertidumbre de la difusividad puede ser considerable y depende fuertemente de la incertidumbre de las dos mediciones.

Para atenuar esta incertidumbre se propone en este trabajo que se utilicen más de dos profundidades de medición del tiempo según lo sugerido por Miller y Miller (2000). Para aplicar la anterior recomendación es apropiado se emplee un modelo de regresión lineal entre los valores de tiempo de los máximos de temperatura y profundidades para calcular la profundidad a la que se tendría un periodo completo (un día) de desfase de la onda térmica. Se determinó el tiempo en que ocurre la máxima temperatura (cresta de onda) para cuatro periodos o días de experimentación, analizados a, b, c y d, a las profundidades correspondientes a los sensores, estos cuatro casos analizados son con el fin de corroborar estadísticamente que el fenómeno se repite. Los valores obtenidos se registran en la Tabla 1 en la cual el tiempo se expresa en formato decimal.

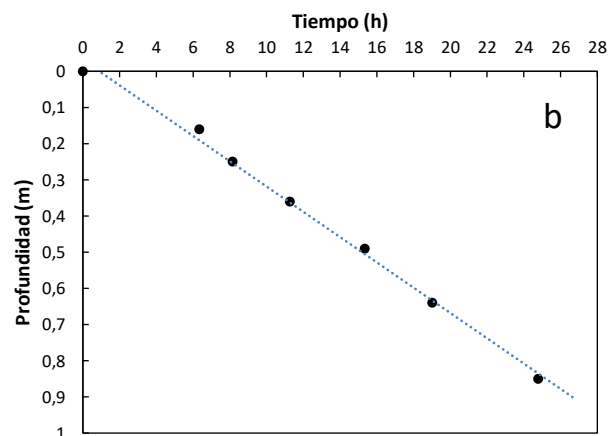
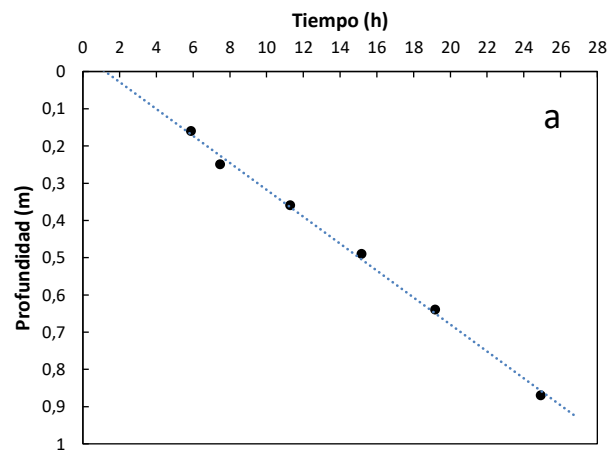
| Periodo | Tiempo de cresta de onda (h) | | | | | |
|---------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| | 0.0 0 | 0.16 | 0.25 | 0.36 | 0.4 9 | 0.6 4 |
| a | | 19.2 2 | 20.8 0 | 0.61 | 4.4 9 | 8.5 1 |
| b | 13. 10 | 19.4 4 | 21.2 5 | 0.36 | 4.4 4 | 8.1 2 |
| c | 13. 21 | 18.3 7 | 20.3 2 | 23.3 8 | 3.4 4 | 6.9 4 |
| d | 13. 38 | 18.4 7 | 20.2 1 | 22.1 2 | 2.2 4 | 7.4 9 |

Tabla 1 Tiempo de temperatura máxima de onda térmica por periodo y profundidad

Se observa en la Tabla 1, que no se consideran los tiempos de los termopares a 0.81 y 1.00 m debido a que la amplitud de temperatura en la onda térmica es despreciable, tampoco se considera el tiempo a 0.0 m del periodo a, ya que la experimentación fue iniciada en tiempo posterior a la máxima temperatura superficial del día.

Al aplicar regresión lineal a los datos de profundidad de medición de temperatura máxima con el intervalo de tiempo entre crestas de onda se obtiene la ecuación que utilizamos para encontrar la mencionada profundidad z, haciendo el tiempo igual a un día. De no hacerlo así sería necesaria la instalación continua de termopares en la sonda de medición para encontrar la posición justa del termopar a la que concurre la temperatura máxima en 24 h.

En los Gráficos 2 a, b, c y d, cada marcador representan en que tiempo coincide la máxima temperatura de onda en el termopar a la profundidad indicada en el eje de ordenadas, el conjunto de marcadores nos indica la tendencia, por la que se aplica el método de regresión lineal por mínimos cuadrados de las variables profundidad-intervalo de tiempo.



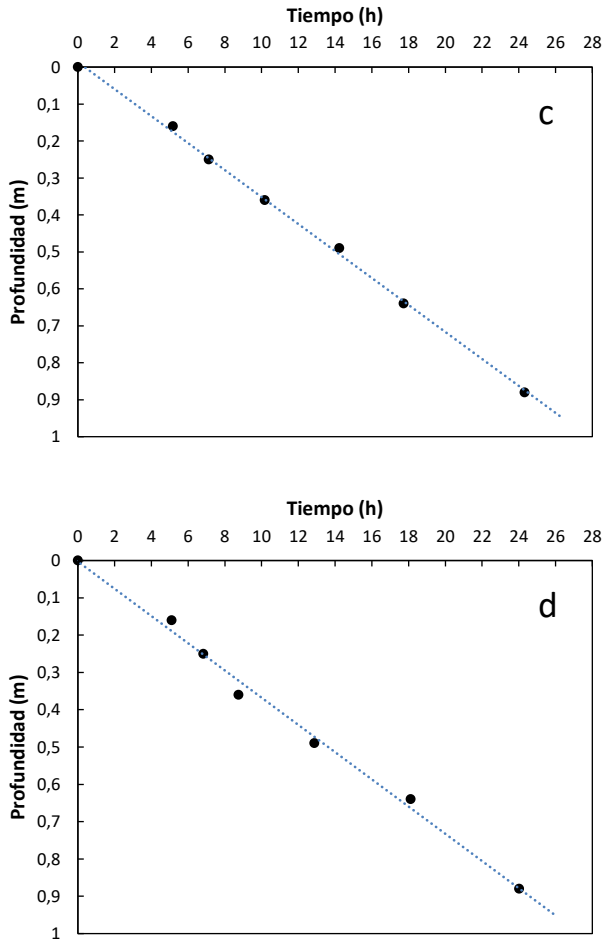


Gráfico 2 Regresión lineal de profundidad-intervalo de tiempo para periodos a, b, c y d

En estos gráficos el dato de mayor profundidad es el valor calculado por extrapolación, que corresponde a la profundidad z en la que la temperatura máxima del subsuelo se retrasa un periodo completo con respecto a la temperatura máxima superficial, a fin de cumplir con la condición $\epsilon z = 2\pi$ aplicada a la ecuación (3). Cabe aclarar que los tiempos en la tabla 1 corresponden al uso horario y el de los gráficos 2 son intervalos de tiempo entre temperaturas máximas.

Las ecuaciones de las líneas rectas obtenidas mediante el método de mínimos cuadrados, el coeficiente de determinación R^2 y la extrapolación cuando el periodo cumple 24 h para determinar la profundidad z calculada de desfase de onda por periodo analizado, se muestran en la Tabla 2.

| Regresión lineal | | | |
|------------------|------------------------|-------|-----------------------------|
| Periodo | Ec. Línea de tendencia | R^2 | Profundidad (z) en 24 h (m) |
| a | $y = 0.9135 + 28.631x$ | 0.995 | 0.870 |
| b | $y = 0.7719 + 29.205x$ | 0.993 | 0.848 |
| c | $y = 0.3013 + 27.689x$ | 0.998 | 0.878 |
| d | $y = 0.0120 + 27.142x$ | 0.988 | 0.885 |

Es de observar que los coeficientes de determinación son cercanos a la unidad y en todos los casos superan el valor crítico a un nivel de confianza del 95% indicado en Ebdon, (1991).

Propagación de error de la difusividad

En esta sección se determina en primer término los errores de la regresión lineal que son necesarios para la propagación de error de la difusividad. La elección de la ecuación de la recta tiene la forma de la Ec. 6. Donde el coeficiente a es el intercepto en el eje de ordenadas y el coeficiente b es la pendiente de la recta.

$$y = a + bx \tag{6}$$

Los parámetros de regresión lineal ordinaria (la pendiente b y el intercepto a) no están libres de error ya que los datos utilizados están sujetos a errores aleatorios.

Las ecuaciones propuestas por Miller y Miller, (2000) para el error estándar de los coeficientes de regresión para el intercepto y la pendiente se estiman con las Ec. 7 y 8, respectivamente.

$$S_a = \sqrt[2]{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \sum x_i^2}{n(n-2) \sum (x_i - \bar{x})^2}} \tag{7}$$

$$S_b = \sqrt[2]{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n-2) \sum (x_i - \bar{x})^2}} \tag{8}$$

donde S_a es el error estándar del intercepto, S_b el error estándar de la pendiente, y_i es el valor de la medición para el dato i ésimo, \hat{y}_i es el valor calculado para el mismo valor de x (del dato x_i, y_i) usando la ecuación de regresión. Los intervalos de confianza de la pendiente b y el intercepto a están dados por las Ec. 9 y 10:

$$\{b - (t_{(n-2)} S_b)\} < \mu_b < \{b + (t_{(n-2)} S_b)\} \tag{9}$$

$$\{a - (t_{(n-2)} S_a)\} < \mu_a < \{a + (t_{(n-2)} S_a)\} \tag{10}$$

donde $t_{(n-2)}$ es el valor crítico de t de Student, (two-tailed) con $(n-2)$ grados de libertad, que en el presente trabajo se considera a un nivel de confianza de 95%. En la Tabla 3 se muestra el resultado de los cálculos para cada uno de los periodos

| Periodo | Error intercepto y pendiente | | $t_{(n-2)}$ | L. Confianza 95% | |
|---------|------------------------------|-------|-------------|------------------|-------|
| | Sa | Sb | | a ± | b ± |
| a | 0.552 | 1.325 | 3.182 | 1.756 | 4.216 |
| b | 0.477 | 1.254 | 2.776 | 1.324 | 3.482 |
| c | 0.263 | 0.693 | 2.776 | 0.731 | 1.923 |
| d | 0.567 | 1.491 | 2.776 | 1.574 | 4.140 |

Tabla 3 Error de regresión lineal

El error estándar global de la profundidad S_Z a la cual el desfase de onda es de un periodo de 24 h se obtiene con la Ec. 11 (Miller y Miller, 2000).

$$S_Z = \frac{S_{y/x}}{b} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(y_i - \bar{y})^2}{b^2 \sum (x_i - \bar{x})^2}} \tag{11}$$

donde $S_{y/x}$ está dado por la Ec. 12

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n-2)}} \tag{12}$$

La fórmula específica empleada en la propagación de error, de exponencial de variables $X = aU^b$, propuesta por Bevington and Robinson (2003), es la Ec. 13 en donde el signo \approx de la fórmula destaca la naturaleza aproximada, debido a que se desprecian los términos de alto grado en la expansión de la serie de Taylor.

$$\frac{S_X}{X} \approx b \frac{S_U}{U} \tag{13}$$

Aplicando la formula especifica 13 de propagación de error a la ecuación de difusividad 5 por desfase de onda térmica. La propagación de error de la difusividad S_α está dada por la Ec. 14:

$$S_\alpha = \frac{z S_Z}{2\pi P} \tag{14}$$

El resultado del cálculo de propagación de error para cada uno de los periodos se muestra en la Tabla 4, donde se observa la similitud en el error de la difusividad entre periodos.

| Propagación de error | | | |
|----------------------|-----------------|----------------|--------------------------|
| Periodo | S _{xy} | S _z | S _α |
| a | 0.683 | 0.036 | 5.73 X 10 ⁻⁰⁸ |
| b | 0.647 | 0.032 | 5.18 X 10 ⁻⁰⁸ |
| c | 0.357 | 0.020 | 3.17 X 10 ⁻⁰⁸ |
| d | 0.769 | 0.044 | 7.12 X 10 ⁻⁰⁸ |

Tabla 4 Propagación de Error de la difusividad

Resultados y Discusión

La aplicación de la Ec. 5, de difusividad utilizando la profundidad z determinada por extrapolación, así como el cálculo de error mediante la Ec. 14 de los cuatro periodos analizados, nos arrojan los resultados de la difusividad media aparente con sus intervalos de error correspondientes y su equivalente porcentual del error relativo mostrados en la Tabla 5:

| Periodo | Difusividad (m ² /s) | α | Error % |
|---------|----------------------------------|---|---------|
| a | (6.974 ± 0.6) x 10 ⁻⁷ | | 8.22 |
| b | (6.626 ± 0.5) x 10 ⁻⁷ | | 7.42 |
| c | (7.094 ± 0.3) x 10 ⁻⁷ | | 4.39 |
| d | (7.209 ± 0.7) x 10 ⁻⁷ | | 9.88 |

Tabla 5 Resultados experimentales de difusividad

Es relevante constatar que los valores obtenidos de difusividad incluyendo los intervalos de error propagados del material de estudio, con el método experimental propuesto de desfase de onda térmica, están dentro del intervalo de valores de difusividad térmica reportados por Florides y Kalogirou (2004) para arena seca y húmeda. En la Tabla 6, se muestra el intervalo de difusividad.

| Tipo de suelo | α (m ² /s) |
|----------------|------------------------|
| Roca | 2.0 x 10 ⁻⁶ |
| Arena seca | 1.0 x 10 ⁻⁷ |
| Arena húmeda | 1.0 x 10 ⁻⁶ |
| Arcilla seca | 2.0 x 10 ⁻⁷ |
| Arcilla húmeda | 1.5 x 10 ⁻⁶ |

Tabla 6 Valores de difusividad térmica (Tomada de Florides y Kalogirou, 2004)

En la figura 4 se muestra gráficamente los resultados obtenidos en la determinación de la difusividad térmica con el método utilizado mostrándose los límites reportados por Florides y Kalogirou (2004).

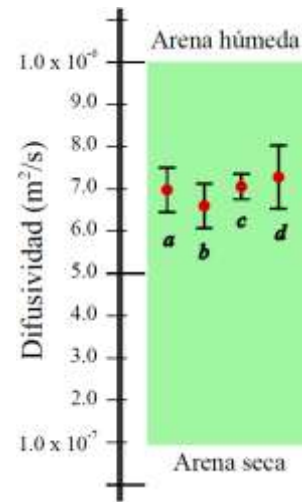


Figura 4 Comparativo de resultados con datos publicados

Agradecimiento

Los autores de este trabajo agradecen las facilidades proporcionadas para el uso de equipo e instalaciones del laboratorio de energía de la Facultad de Ingeniería y del Centro de Investigación en Recursos Energéticos y Sustentables de la Universidad Veracruzana.

Conclusiones

Se demuestra con los resultados de difusividad térmica obtenidos que el método experimental *in situ* de la difusividad aparente del suelo por desfase de onda térmica con las características propuestas se encuentran dentro del intervalo de valores de difusividad térmica de suelo arenoso publicados en la literatura.

Es de hacer notar que en la literatura no se indica el método aplicado para la obtención de los valores, y ni el intervalo de confianza de los mismos. La aplicación de la propagación de error en el método que se propone en este trabajo, confirma el alto grado de confiabilidad, por los reducidos intervalos de error de los valores obtenidos y la bondad del método para poder replicar los resultados.

Esta metodología ofrece ventajas económicas al requerir equipos no especializados y ahorro del consumo de energía para una fuente de calor.

Es de resaltar la ventaja de realizar las mediciones en las condiciones naturales del suelo, sin necesidad de sacar muestras para medirlas en el laboratorio.

Una limitante de la metodología propuesta es que puede ser aplicada sólo para mediciones de difusividad hasta profundidades donde la variación cíclica diaria afecta notoriamente al subsuelo, que se estima próximas a 1.0 m dependiendo esta de su composición mineral, porosidad y contenido de agua.

Se recomienda la instalación del primer sensor de temperatura a profundidades de 0.03 a 0.05 m en lugar del sensor de la superficie del suelo, para amortiguar las variaciones de temperatura por condiciones ambientales como vientos y nubes.

Esto facilitará la determinación estadística de las crestas de onda térmica en cada periodo.

Referencias

ABU-HAMDEH, NH. 2001. Measurement of the thermal conductivity of sandy loam and clay loam soils using single and dual probes. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 80 (2), pp. 209-216. ISSN: 1095-9246, DOI:10.1006/jaer.2001.0730

BEVINGTON, P.R., ROBINSON, D.K. *Data reduction and error analysis for the physical sciences*. Third edition. Boston: Mc-Graw Hill, 2003. ISBN 0-07 247227-8.

BEARDSMORE, G., CULL, J. *Crustal Heat Flow. A Guide to Measurement and Modelling*. First edition. Cambridge. Cambridge University Press, 2001. ISBN 0-0521-79703-9.

BODZENTA, J. 2008. Thermal wave methods in investigation of thermal properties of solids, *European Physical Journal Special Topics* 154, pp. 305–311. ISSN: 1951-6355 DOI: 10.1140/epjst/e2008-00566-5

CARSLAW, H.S., JAEGER, J.C. *Conduction of Heat in Solids*. Second edition. Oxford. Oxford University Press, 1986. ISBN 13: 9780198533689

DANKO, G., SHAH, N., BAHRAMI, D. 2002. Evaluation of lithophysical conductivity, diffusivity, and porosity measurements using the REKA method. *WM'02 Conference*, February, Tucson, AZ., 1-13.

DEMIR, H., KOYUN, A., TEMIR, G. 2009. Heat transfer of horizontal parallel pipe ground heat exchanger and experimental verification. *Applied Thermal Engineering* 29, pp. 224–233.

ISSN: 1359-4311, DOI:10.1016/j.applthermaleng.2008.02.027

EBDON, D. *Statistics in geography: A Practical Approach*. Second edition. Oxford, Wiley & Sons, 1991. ISBN: 13 978-0-631-13688-0

FLORIDES, G., KALOGIROU, S. 2004. Measurements of ground temperature at various depths, *Proceedings, 3rd International Conference on Sustainable Energy Technologies*, Nottingham, UK.

GAO, Z., WANG, L., HORTON, R. 2009. Comparison of six algorithms to determine the soil thermal diffusivity at a site in the Loess Plateau of China, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 6, pp 2247–2274. ISSN: 1812-2108

GILLIES, A.D.S., CREEVY, P., DANKO, G., MOUSSET-JONES, P.E. 1991. In-situ Mine Measurement of Rock Conductivity and Diffusivity Properties. *Proceedings Fifth Int. Mine Ventilation Congress*, Johannesburg, October, 139-144. ISBN-13: 978-0873350990

HISANO, K., SAWAI, S., MORIMOTO, K. 1999. Simultaneous Measurement of Specific Heat Capacity, Thermal Conductivity, and Thermal Diffusivity by Thermal Radiation Calorimetry. *International Journal of Thermophysics*. Vol 20, 2, pp 733-742. ISSN: 1572-9567 DOI:10.1023/A:1022633910850

HORTON, R., WIERENGA, P.J., NIELSEN, D.R. 1983. Evaluation of methods for determining the apparent thermal diffusivity of soil near the surface. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: pp. 25-32. ISSN: 0361-5995,

LÓPEZ, A., ZERMEÑO, A., GONZÁLEZ, J., GONZÁLEZ, G., CADENA, M., CAMPOS, S. 2014. Medición de la profundidad de flujo de calor y difusividad térmica en suelos con texturas diferentes por dos métodos de análisis.

Investigación y Ciencia, Universidad Autónoma de Aguascalientes, No 62: pp. 17-25. ISSN: 1665-4412

MARTINSONS, C. D., LEVICK, A. P., EDWARDS, G. J. 2003. Measurement of the Thermal Diffusivity of Solids with Improved Accuracy. *International Journal of Thermophysics*, Vol. 24, No. 4, pp.1171-1183. ISSN: 0195-928X

MILLER, J.N., MILLER, J.C. *Estadística y Quimiometría para Química Analítica*. Cuarta edición. Madrid. Prentice Hall, Pearson Education, 2002. ISBN: 84-205-3514-1

OZGENER, L. 2011. A review on the experimental and analytical analysis of earth to air heat exchanger (EAHE) systems in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, pp. 4483– 4490. ISSN: 1364-0321, DOI:10.1016/j.rser.2011.07.103

PERSAUD, N., CHANG, A. 1986. Computing mean apparent soil thermal diffusivity from daily observations of soil temperature at two depths. *Soil Science*, 139, 4, pp. 297-303. ISSN: 0038-075X

POULOUPATIS, P.D., FLORIDES, G., TASSOU, S. 2011. Measurements of ground temperatures in Cyprus for ground thermal applications. *Renewable Energy* 36, pp. 804-814. ISSN: 0960-1481, DOI:10.1016/j.renene.2010.07.029

RAJEEV, P., KODIKARA, J. 2015. Estimating apparent thermal diffusivity of soil using field temperature time series. *Geomechanics and Geoengineering*, Vol. 11, 1, pp. 28-46. ISSN:1748-6025