

Acondicionamiento térmico de aire usando energía geotérmica-ondas de calor



Leila Iannelli, Salvador Gil

Universidad Nacional de San Martín, Campus Miguelete, 79) Av. 25 de Mayo y (34) Francia, San Martín (1650), Buenos Aires, Argentina.

E-mail: sgil@unsam.edu.ar

(Recibido el 29 de Diciembre de 2011; aceptado el 8 de Marzo de 2012)

Resumen

En este trabajo realizamos un estudio teórico-experimental de la propagación de ondas térmicas en el suelo. Se discute la potencialidad de usar tubos enterrados como alternativa de acondicionamiento térmico de ambientes. En particular se realiza un estudio de las propiedades térmicas del suelo en la Provincia de Buenos Aires, Argentina, con el objeto de evaluar la posibilidad de aprovechar la energía geotérmica del suelo, a poca profundidad, como sistema de acondicionamiento térmico de ambientes. El presente experimento permite determinar la difusividad y la conductividad térmica del suelo, es de bajo costo y fácil de realizar. Esta actividad puede ser útil para conectar aspectos de la física básica con la solución de un problema tecnológico de mucha implicancia ambiental, política y económica.

Palabras clave: Ecuación de Fourier-Biot del calor, experimentos de bajo costo, propiedades térmicas, sistema de acondicionamiento de ambientes, intercambiadores tierra-aire, ahorro energético y reducción de emisiones de gases de invernadero.

Abstract

In this paper we carry out a theoretical and experimental study of thermal wave propagation in soil. We discuss the potential use of buried pipes as an alternative thermal conditioning of environments. In particular, we study the thermal properties of soil in the province of Buenos Aires, Argentina, in order to evaluate the possibility of using geothermal energy from the ground, at shallow depth, as thermal air conditioning system. The present experiment allows us to determine the diffusivity and thermal conductivity of the soil. It is low cost and easy to perform. This activity can be of use to connect aspects of basic physics with the solution of a technological problem of great environmental, political and economic implication.

Keywords: Fourier-Biot equation, heat waves, low-cost experiments, thermal properties, air conditioning system, ground-air heat exchangers, saving energy and reducing greenhouse gas emissions.

PACS: 88.10.Cn, 88.05.Ec, 07.05.Bx, 44.10.+i, 72.15.Eb, 91.35.Dc, 01.50.My, 01.90.+g

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Un objetivo deseable de los cursos de física para las carreras de ingeniería es, que además de introducir los fundamentos de la disciplina y lograr cierta capacidad operativa en el uso de las leyes fundamentales, ilustre cómo esta disciplina puede utilizarse para solucionar algunos problemas prácticos. Estas aplicaciones resultan más atractivas y motivadoras si ellas contribuyen a resolver problemas de alto impacto social.

Uno de los grandes desafíos del siglo XXI es satisfacer las crecientes demandas de energía del mundo, incluir a vastos sectores sociales de bajos recursos en el uso de la energía y al mismo tiempo disminuir las emisiones de gases de efecto de invernadero (GEI) [1, 2]. Hay evidencias cada vez más claras de que el calentamiento global que está experimentando la Tierra tiene causas antropogénicas. Por lo tanto, es necesario que disminuyamos nuestras emisiones

de GEI y hagamos un uso más racional y eficiente de la energía [1, 2].

En Argentina, el consumo de energía en edificios (viviendas, instalaciones comerciales y públicas) es de aproximadamente 30% del total. De este consumo alrededor del 50% se usa en viviendas para acondicionamiento de aire, calefacción y refrigeración. Por lo tanto, al menos el 15% del consumo energético total del país, se emplea en acondicionamiento térmico. En los EE.UU. el consumo de energía en edificios es de alrededor del 40%. Se estima que la proporción de energía usada en acondicionamiento térmico de interiores es superior al 20% de toda la energía usada en ese país. Desde luego dependiendo del tipo de clima, del tamaño, características de la construcción y prestaciones de los edificios, la fracción de energía que se usa en acondicionamiento térmico del aire interior varía de lugar a lugar, pero en general es una fracción muy significativa [2]. Dada la magnitud de estos consumos es preciso explorar todas las

alternativas para hacer un uso más racional y eficiente de los recursos energéticos disponibles y disminuir nuestras emisiones de GEI. Creemos que acercar a los estudiantes de ciencia y tecnología a esta problemática es enriquecedor, estimulante y al mismo tiempo ilustrativo de cómo la ciencia puede hacer aportes esenciales para contribuir a resolver esta encrucijada social, política y económica, asociada con el uso de los recursos energéticos, que nos incumbe a todos.

La Tierra se comporta como un gran colector y acumulador de energía. El suelo posee muchas propiedades térmicas interesantes debido a su alta capacidad calorífica y gran aislamiento térmico. Con una densidad media de $1800\text{--}2500\text{kg/m}^3$, un calor específico de 920J/kg.K y una conductividad térmica media de 0.3W/m.K (comparada con 0.58W/m.K para el agua y 380W/m.K para el cobre); da como resultado que la capacidad térmica volumétrica del suelo es de alrededor de $2\text{MJ/m}^3\text{.K}$ comparada con $4.5\text{MJ/m}^3\text{.K}$ para el agua. Por lo tanto, es posible considerar al suelo como un gran acumulador de calor. Por otra parte, su baja conductividad térmica hace que la penetración del calor en el suelo sea muy lenta, al igual que su enfriamiento.

Todo esto conduce a que las variaciones diurnas de la temperatura no penetren más allá de 0.5m , y las variaciones estacionales no superen una profundidad de 2 a 4m . Más allá de estas profundidades, la temperatura de la Tierra se mantiene constante en el tiempo. El valor de esta temperatura es generalmente igual al valor medio de la temperatura anual de la superficie. En el caso de la zona central de Argentina, esta temperatura es del orden de 17.5°C . Lo interesante es que esta temperatura es muy próxima a la temperatura de confort a lo largo de todo el año. A profundidades mayores, entre una decena de metros y unos pocos kilómetros, hay un gradiente térmico de unos 20 a 30K/km [3]. De modo que si se pudiese hacer circular el aire a través de tubos enterrados, antes de llegar al interior de los edificios y viviendas, la tierra podría utilizarse como sistema de acondicionamiento térmico natural del aire con el consecuente ahorro de energía y disminución de emisiones de GEI [4, 5, 6, 7].

El potencial térmico de la tierra puede ser explotado convenientemente utilizando dispositivos arquitectónicos y estructurales adecuados. Algunos esquemas se ilustran en la Fig. 1.

Estas propiedades térmicas del suelo no son nuevas, ellas se han venido usando por siglos en las bodegas de almacenamiento de alimentos y en viviendas subterráneas en muchos lugares de la costa mediterránea y en el norte de África [4]. De hecho nuestros antepasados pudieron sobrevivir varios periodos de glaciaciones de la Tierra, utilizando las cavernas como refugios térmicos adecuados. Por otro lado, los sistemas de túneles de aire en la tierra fueron y son utilizados por muchas culturas. Además, son conocidas las virtudes de las viviendas construidas en cuevas en el sur de España y Grecia, muy elogiadas por su "frescura" y "calidez". Muchas de estas viviendas se han transformado en Boutique Hotel de esas regiones del mundo [8].

Uso de energía geotérmica para acondicionamiento térmico de ambientes

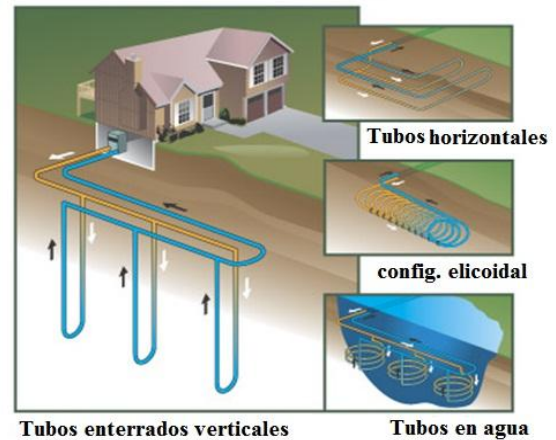


FIGURA 1. Diferentes esquemas que pueden utilizarse para el acondicionamiento térmico de viviendas utilizando la energía geotérmica [4, 5, 6, 7].

El acoplamiento térmico del suelo con el interior de las viviendas o edificios puede lograrse por distintos medios, tanto directos como indirectos, ver Fig. 1. Un modo directo de acoplamiento consiste en hacer circular el aire directamente por los tubos enterrados antes de entrar a la vivienda. Un acoplamiento indirecto se puede lograr haciendo circular agua por los tubos enterrados y utilizar un intercambiador de calor, opcionalmente asociado con una bomba de calor, para el acondicionamiento de aire interno [5, 6].

El régimen de temperaturas a profundidades de unos pocos metros es muy estable, con sólo una pequeña variación estacional, y sin fluctuación diurna. Esto se debe al hecho de que las ondas térmicas se amortiguan tanto más rápidamente cuanto mayor es su frecuencia. El objetivo del presente trabajo es explorar las características básicas de las ondas térmicas, diarias y anuales, en la Tierra.

Como discutiremos más adelante, las fluctuaciones térmicas diurnas (ciclo de un día) disminuyen en menos de 0.5m .

Por su parte, las ondas anuales (ciclo de un año) se atenúan más profundamente, 2 a 4m . La gran masa y capacidad térmica del suelo posibilita utilizarlo como sumidero y fuente de energía, tanto para refrigeración como para calefacción.

En las Sec. II se presenta una síntesis de modelo teórico para describir las ondas térmicas en el suelo, en la Sec. III se discute el arreglo experimental propuesto y en la Sec. IV se discuten los resultados obtenidos.

II. MODELO TEÓRICO

El calor se transfiere básicamente por tres procesos distintos: Conducción, convección y radiación. En el caso del suelo, a poca profundidad el principal mecanismo de transferencia de calor es la conducción. Para ser más

específicos, consideramos un modelo unidimensional de conducción de calor, consistente en una barra, rodeada de un material aislante, de modo que el mecanismo principal de propagación de calor por la misma sea la conducción. Tomamos el eje x coincidente con el eje de la barra. Este modelo también podría aplicarse a un volumen semi-infinito, expuesto a una fuente de calor extensa, de modo que la única dimensión relevante del problema es definida por el eje x , perpendicular a la cara expuesta a la fuente térmica. La física de este problema viene descrita por la ecuación general de difusión del calor o ecuación de Fourier Biot [9, 10, 11]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1)$$

donde $T(x, t)$ es temperatura del elemento infinitesimal, en un dado instante t , ver Fig. 2 y k es la *difusividad* del material, que depende de la conductividad térmica K , densidad ρ , y calor específico c . De modo que $k = K / c \cdot \rho$. El término dT/dx es el gradiente térmico.

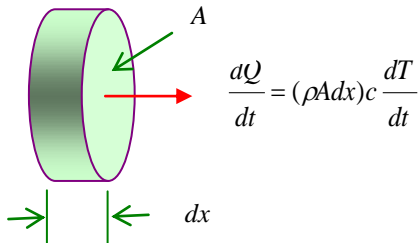


FIGURA 2. Transmisión de calor unidimensional a través de un elemento infinitesimal de materia de espesor dx , densidad ρ y calor específico c . dQ/dt es el calor que fluye del elemento infinitesimal por unidad de tiempo.

Ondas térmicas unidimensionales

Consideremos el caso de una barra de longitud L , con su extremo izquierdo en contacto con una fuente térmica que tiene una temperatura que varía como:

$$T_a(t) = T_a^0 \cos(\omega_0 t + \phi_0) + T_{b0}, \quad (2)$$

donde T_a^0 es la amplitud de la oscilación térmica alrededor del valor medio T_{b0} , $\omega_0 = 2\pi/p_0$ es la frecuencia angular, p_0 su período y ϕ_0 la fase inicial de la oscilación. Este modelo también se puede utilizar para describir un sistema semi-infinito unidimensional, por ejemplo la Tierra, donde la fuente de calor es la superficie, que es calentada por el Sol. En este caso el eje x es vertical y penetra en la Tierra.

Consideremos en primer término el caso estacionario, de una fuente térmica de temperatura constante, T_{b0} , y con el otro extremo ($x=L$), a una temperatura fija igual a T_{00} . En

Acondicionamiento Térmico de Aire Usando Energía Geotérmica estado estacionario, es de esperar que la temperatura de la barra venga descrita por una función $T_b(x)$ dada por:

$$T_b(x) = T_{b0} - \frac{(T_{b0} - T_{00})}{L} x = T_{b0} - m \cdot x, \quad (3)$$

donde T_{b0} es la temperatura del extremo izquierdo, contiguo a la fuente térmica, que supondremos coincide con la temperatura ambiente en el caso de la Tierra. En este análisis despreciamos las pérdidas de calor por otros mecanismos, como ser convección o radiación, pues suponemos que la aislación térmica de la barra minimiza las pérdidas por otros mecanismos de transmisión del calor. En el caso de la Tierra, esta simplificación está bien justificada, ya que el Sol, que actúa como la fuente de calor, calienta por igual toda la superficie y el calor se propaga en la dirección vertical, de idéntica forma para todos los elementos de suelo que sean adyacentes.

Volviendo al caso en que la temperatura del extremo izquierdo esté sometida a una temperatura oscilante, o que la superficie del suelo esté sometida a variaciones de irradiación por parte del Sol, la ecuación de difusión del calor viene dada por la Ec. (1). Definimos la temperatura normalizada $\theta(x, t) = T(x, t) - T_b(x)$, donde $T_b(x)$, viene dada por la Ec. (3), siendo $T_b(x)$ la temperatura promedio temporal de la barra en la posición x . La ecuación que debe satisfacer $\theta(x, t)$ es:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{1}{k} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t}, \quad (4)$$

ya que $\partial^2 T_b / \partial x^2 = 0$. La Ec. (4) es una ecuación diferencial lineal que puede resolverse por separación de variables [12]. Su solución para condiciones de borde periódicas, puede escribirse como [11, 12]:

$$\theta(x, t) = A_0 \exp(-x / \mu_0) \cos(\omega_0 t \pm x / \mu_0 + \phi_0). \quad (5)$$

Esta expresión representa una onda térmica atenuada que se propaga con velocidad v_0 hacia la derecha (-) o hacia la izquierda (+), dependiendo del signo del argumento de la función coseno. Aquí μ_0 representa la distancia característica de penetración de la onda. Reemplazando (5) en (4) obtenemos:

$$\mu_0 = \sqrt{\frac{2k}{\omega_0}} = \sqrt{\frac{p_0 \cdot k}{\pi}} = \frac{\lambda}{2\pi}, \quad (6)$$

y

$$\varepsilon_0 = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{1}{\mu_0}, \quad (7)$$

donde

$$\lambda = \sqrt{4\pi \cdot kp_0} = 2\pi\varepsilon_0 = \text{longitud de onda}. \quad (8)$$

La velocidad de propagación de la onda es:

$$v_0 = \sqrt{4\pi \cdot k / p_0} = \sqrt{2k\omega_0} = \frac{\lambda}{p_0}, \quad (9)$$

De este modo, la expresión (5) también puede escribirse como:

$$\theta(x, t) = A(x) \cos(x / \mu_0 \pm \omega_0 t + \phi_0), \quad (10)$$

con

$$A(x) = A_0 \exp(-x / \mu_0). \quad (11)$$

La Ec. (10) describe una onda viajera, con amplitud decreciente. Las constantes A_0 y ϕ_0 dependen de las condiciones de borde del problema. $A(x)$ es la amplitud de la onda a la distancia x . El parámetro $\mu_0 = \lambda / 2\pi$ tiene las unidades de longitud y es indicativo de la longitud característica a la que penetra la onda térmica. Para $x=0$:

$$\theta(x=0, t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \phi_0). \quad (12)$$

Es decir, en el punto $x = 0$ tenemos que la temperatura oscila periódicamente con frecuencia $\omega_0 = 2\pi/p_0$.

Según la Ec. (10), una onda térmica penetra con amplitud apreciable, distancias del orden de μ_0 o sea de unas pocas longitudes de onda. La amplitud se atenúa a $1/e^2 \approx 0.135$ (13.5%) de su valor inicial para una distancia $x = 2 \cdot \mu_0 = 0.32 \lambda$.

Según las Ecs. (6) y (9), a medida que el período p_0 de la onda es mayor, mayor será la penetración de la onda térmica y menor su velocidad de propagación. Asimismo, la onda térmica penetra tanto más y viaja más rápido cuanto mayor sea la difusividad del material (k). Este resultado explica por qué las variaciones diarias de temperatura sólo penetran en el suelo a unos 50cm (con $k_{tierra} \approx 3.8 \text{m}^2/\text{s}$ y $p_0 = 24\text{h}$ resulta $\mu_0 \approx 10\text{cm}$), en cambio las variaciones anuales ($p_0 = 365$ días) penetran en la Tierra hasta unos 4 o 5m ($\mu_0 \approx 2\text{m}$ y $\lambda \approx 8\text{m}$) [13, 14], las temperaturas asociadas a la última era glacial ($p_0 \approx 10000$ años) estarían entre unos 200 a 300m de profundidad. De este modo, en las profundidades de la Tierra, quedan registradas las temperaturas del pasado [11, 13].

III. EXPERIMENTO

Para este experimento se utilizó una sonda de plástico de 35cm de longitud. Se realizaron cuatro perforaciones equiespaciadas a lo largo del eje x , eje vertical, en las cuales se introdujeron los sensores térmicos (termistores NTC). Un sensor de temperatura se colocó a 4cm sobre la superficie del suelo para que registre la temperatura ambiente.

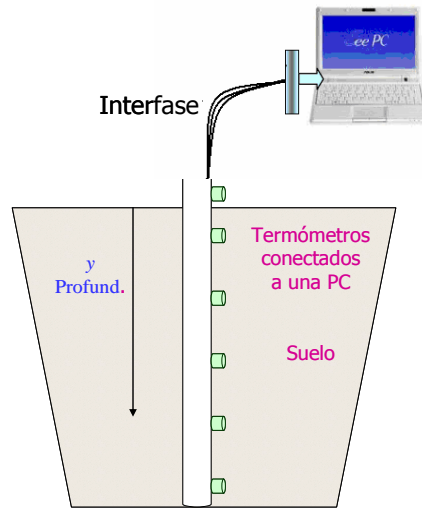


FIGURA 3. Arreglo experimental para medir las ondas térmicas del suelo a diversas profundidades.

Finalmente se introdujo la sonda en el suelo, a la intemperie y a su alrededor se le colocó arena. Las temperaturas se monitorearon usando un sistema de adquisición de datos conectado a una computadora personal (PC). Se estudió la propagación de las ondas a lo largo de varias semanas. Sin embargo con datos tomados a lo largo de 3 o 4 días, ya se puede ver las características básicas de este proceso. En la Fig. 3 se muestra un diagrama esquemático del arreglo experimental.

IV. RESULTADOS

La tasa de medición utilizada para registrar las temperaturas fue 60s. La Fig. 4 ilustra los resultados de $\theta(x, t) = T(x, t) - T_b(x)$.

Se observa que el calor se propaga en forma de ondas, con amplitudes decrecientes. El termómetro que se encuentra más cerca de la superficie de la tierra (curva azul) tiene mayor amplitud que aquellos que están más alejados.

El cálculo de la constante de difusividad se realizó mediante dos métodos diferentes [11], midiendo la atenuación de la amplitud térmica en función de la profundidad y midiendo la velocidad de propagación de la onda térmica. En la Fig. 5 se muestran los resultados obtenidos analizando la variación de la amplitud de la onda como función de la profundidad. En esta figura se representó el logaritmo de la amplitud máxima de cada termómetro como función de su posición (profundidad). Como se ve, la dependencia de $\ln(A(x))$ como función de la profundidad (x) es aproximadamente lineal, en concordancia con la predicción del modelo, Ec. (11). La pendiente de la recta que mejor se ajusta a los datos experimentales, es la inversa de la distancia de penetración de la onda, μ_0 , a partir de la cual se pudo obtener la constante de difusividad térmica mediante la Ec. (6), donde p_0 es igual a 24hrs.

Otro método para determinar k consiste en medir la velocidad de propagación de la onda térmica. Para ello se determina el tiempo, t , en el que la onda térmica pasa por un máximo (o mínimo) para cada termómetro. Se graficó la posición x de cada termómetro en función del tiempo, t , que demoró la onda en llegar a cada uno. La Fig. 6, muestra los resultados obtenidos.

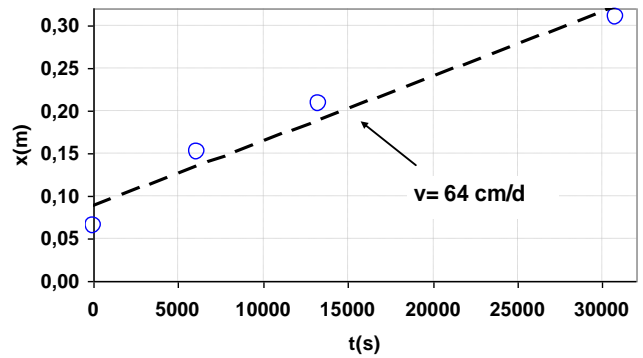


FIGURA 6. Gráfico del perfil de profundidad en función del tiempo que tardó en producirse la máxima temperatura en cada uno los termómetros. La línea indica la tendencia lineal que describen los puntos.

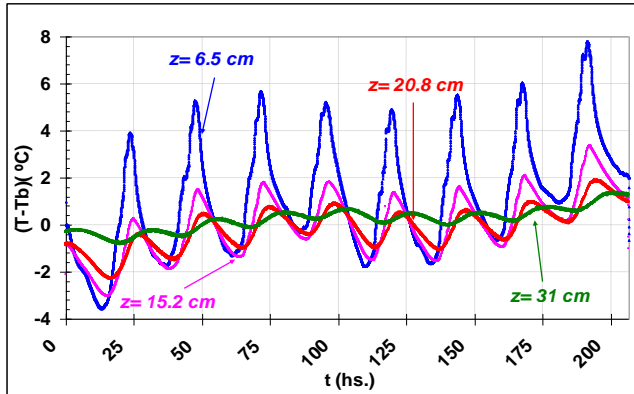


FIGURA 4. Variación de la temperatura en distintas posiciones (profundidades) de la sonda como función del tiempo. Los valores máximos y mínimos para los distintos termómetros, se alcanzan en distintos tiempos.

En la Fig. 6 la pendiente de la línea recta es la velocidad de propagación de la onda en el suelo, v_0 , a partir de cuyo valor se pudo obtener el de la constante de difusividad, Ec. (9).

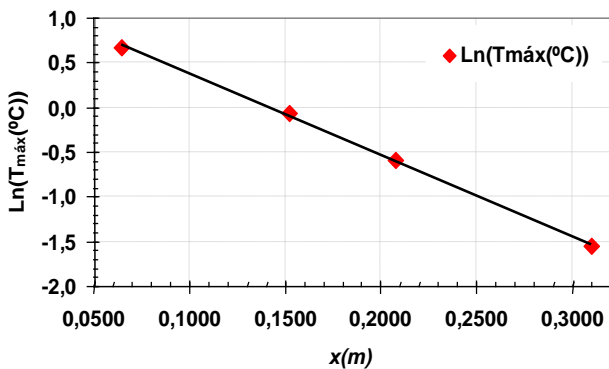


FIGURA 5. Logaritmo de la amplitud térmica máxima en función de la posición, x , desde la superficie de la tierra hasta cada uno de los termómetros.

Los valores obtenidos de la constante de difusividad térmica, determinados por ambos métodos, se muestran en la Tabla I, con sus respectivos errores. También en esta tabla se encuentra el valor tabulado de los coeficientes de difusividad térmica para la arcilla y para la arena.

TABLA I. Tabla comparativa entre los valores de los coeficientes de difusividad térmica tabulados para la arena y para la arcilla y los hallados experimentalmente por los dos métodos propuestos.

Coefficiente de difusividad térmica	k experimental ($m^2/s \times 10^{-6}$)	k tabulado (arcilla) ($m^2/s \times 10^{-6}$)	k tabulado (arena) ($m^2/s \times 10^{-6}$)
Método 1 (μ_0)	0.443±0.002	0.26-0.4	0.296-0.521
Método 2 (v_0)	0.4±0.1	0.26-0.4	0.296-0.521
Mejor valor de k	0.443±0.002	0.26-0.4	0.296-0.521

La Fig 7, muestra las temperaturas promedio en función de los meses desde el año 1944 al 2010. En este gráfico se pueden observar tres curvas: La de color rojo representa las temperaturas medias; la de color naranja representa las temperaturas máximas y la de color verde representa las temperaturas mínimas. Por último, la línea recta de 17.7°C de color violeta, que representa la temperatura promedio anual de Buenos Aires.

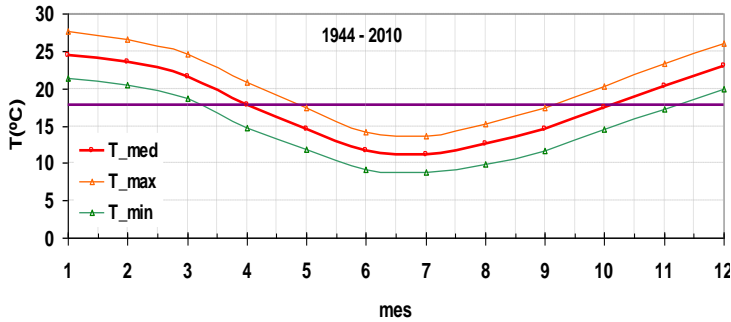


FIGURA 7. Gráfico de las temperaturas (mínima, media y máxima) en función de los meses del año, desde 1944 al 2010. La curva roja representa la temperatura media mensual. Las otras curvas son la variación de la temperatura máxima y mínima media mensual. La línea horizontal representa la temperatura media anual.

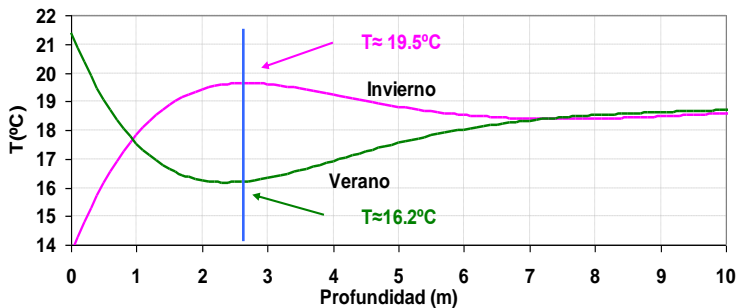


FIGURA 8. Variación de la temperatura del suelo para distintas profundidades, para el invierno (curva rosa) y verano (curva verde).

Tomando como base las temperaturas históricas de Buenos Aires, ajustamos los valores de los parámetros $A_{\theta}(=T_a^0 - T_{bo})$ y ϕ , con $p_0=365$ d, de las Ecs. (2) o (12), de modo de reproducir las temperaturas medias mensuales de la Fig. 7. El valor de la constante de difusividad térmica, k , es el determinado en este estudio, Tabla I. Usando las Ecs. (10) y (11), obtenemos los perfiles térmicos asociados a un dado momento t , como los ilustrados en la Fig. 8. Esta figura muestra la variación de la temperatura en función de la profundidad, x , para dos meses del año enero (verano) y julio (invierno), de la onda de calor en la Tierra generada por la variación anual de temperatura. En esta figura se puede observar que a una profundidad de aproximadamente 2.5m, en invierno puede haber una temperatura de 19.5°C y en verano una temperatura de 16°C. En otras palabras, a esta profundidad se produce una inversión térmica; está más caliente que el promedio en invierno y viceversa, más frío que el promedio en verano. Por consiguiente, esta es la profundidad óptima donde sería conveniente enterrar los tubos para optimizar el intercambio térmico con los ambientes interiores [5].

V. CONCLUSIONES

Este trabajo ilustra un sistema experimental sencillo y de bajo costo, para estudiar ondas térmicas en la Tierra y determinar la constante de difusividad del suelo. Los resultados de difusividad se comparan bien, con los tabulados para la arcilla y la arena.

Se observa que las ondas de calor se propagan con una velocidad finita a través del suelo. Para las ondas anuales, verano-invierno, su velocidad es tal, que ellas demoran unos 6 meses en recorrer un par de metros. La amplitud de la onda térmica se va atenuando a medida que aumenta la profundidad. A una profundidad del orden de 2m, se produce una inversión de temperatura. En verano, a esta profundidad, encontramos el terreno más frío que su valor medio anual y viceversa, en inviernos esta zona del suelo está más caliente. De modo que esta región de suelo se convierte en un lugar óptimo para colocar un intercambiador térmico con el interior de las viviendas, que podría usarse por sí mismo, o acompañado de una bomba de calor, en un acondicionador de aire muy interesante de explotar.

Este experimento ilustra que es factible el uso de calor geotérmico para el acondicionamiento térmico de ambientes interiores de viviendas y edificios, con un ahorro considerable de energía y disminuyendo las emisiones de gases de efecto de invernadero.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a Federico Ariganello por su participación en las primeras fases de este proyecto. Agradecemos la lectura del manuscrito y las sugerencias realizadas por A. E. Schwint. Asimismo agradecemos la colaboración de Oscar Romanelli y Javier de Fernández Vázquez en la construcción del dispositivo experimental.

REFERENCIAS

- [1] World Meteorological Organization, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Fourth Assessment Report: Climate Change (2007). http://www.wmo.int/pages/partners/ipcc/index_en.html, consultado el 10 de Diciembre de 2011.
- [2] Mastrandrea, M. D. and Schneider, S. H., *Resource Letter GW-2: Global Warming*, Am. J. Phys.**76**, 608-614 (2008).
- [3] Geothermal gradient, de Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal_gradient, consultado el 20 de Diciembre de 2011.
- [4] Arquitectura subterránea, de Wikipedia, http://es.wikipedia.org/wiki/Arquitectura_subterr%C3%A1nea, consultado el 15 de Diciembre de 2011.

- [5] *Ground-coupled heat exchanger*, de Wikipedia, <http://es.wikipedia.org/wiki/Arquitectura_subterr%C3%A1nea>, consultado el 20 de Diciembre de 2011.
- [6] *Earth Cooling Tubes*, <http://www.energysavers.gov/your_home/space_heating_cooling/index.cfm/mytopic=12460>, consultado el 20 de Diciembre de 2011.
- [7] Sharan, G., *Earth Tube Heat Exchangers for Environmental Control of Farm Buildings in Semi-arid Northwest India*, (IIM Ahmedabad, India, 2008).
- [8] *Underground living*, de Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Underground_living>, consultado el 22 de Diciembre de 2011.

- Acondicionamiento Térmico de Aire Usando Energía Geotérmica*
- [9] Giancoli, D. C., *Física - Principios con Aplicaciones*, (Prentice Hall, México, 1997).
- [10] Cengel, A., *Heat transfer, a practical approach*, (The Mc Graw-Hill Co., N.Y., 2003).
- [11] Iannelli, L. y Gil, S., *Ondas de Calor, Determinación de temperaturas del pasado*, Lat. Am. J. Phys. Educ. **6**, 82-88 (2012).
- [12] Spiegel, M. R., *Advanced Mathematics for Engineers and Scientists*, (McGraw Hill, N.Y., 1980).
- [13] Pollack, N. y Chapman, D. S., *Underground Records of Changing Climate*, Scientific American **268**, 44-50 (1993).
- [14] Redfield, C., *Terrestrial Heat Flow through Sal-Marsh Peat*, Science **148**, 1291-1292 (1965).