Determinación de profundidad óptima para intercambiadores de calor tierra-aire en Saltillo, Coahuila

Determination of optimal depth for earth to air heat exchangers in Saltillo, Coahuila

MOLAR-OROZCO, María Eugenia†*, RÍOS-ARRIOLA, Juan'', BOJÓRQUEZ-MORALES, Gonzalo''' y REYES-LÓPEZ, Jaime Alonso'''

* Universidad Autónoma de Coahuila, Unidad Saltillo, Facultad de Arquitectura Campus Arteaga.
'' Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de ingeniería, Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e ingeniería
''' Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Arquitectura y Diseño, Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Urbanismo y Diseño.

ID 1er Autor: María Eugenia, Molar-Orozco / ORC ID: 0000-0001-5357-5893, Researcher ID Thomson: S-5551-2018, CVU CONACYT ID: 369142

ID 1er Coautor: Juan, Ríos-Arriola / ORC ID: 0000-0003-3067-0075, CVU-CONACYT ID: 984076

ID 2do Coautor: Gonzalo, Bojorquez-Morales / ORC ID: 0000-0001-9303-9278, Researcher ID Thomson: C-8687-2018, CVU-CONACYT: 79645, SNI CONACYT ID: 45005

ID 3er Coautor: Jaime Alonso, Reyes-López / ORC ID: 0000-0001-7962-9191, CVU CONACYT ID: 12637

DOI: 10.35429/JEA.2020.24.7.1.7

Recibido: 10 de Julio, 2020; Aceptado: 30 de Diciembre, 2020

Resumen

En Saltillo Coahuila, debido a la falta de un diseño arquitectónico adecuado algunas viviendas no cumplen con las condiciones de ambiente térmico requerido durante el periodo de invierno, se estima que 471,725 habitantes son afectados por temperaturas hasta -3.4°C, lo que genera problemas de morbilidad, por lo que surge la necesidad de uso de sistemas electromecánicos de climatización con consumos de energía eléctrica de alto costo económico y ambiental. El objetivo del trabajo fue estudiar la viabilidad de aplicación de un intercambiador de calor geotérmico para calentamiento de viviendas. Se estudió mediante ecuaciones validadas experimentalmente la variación periodica de temperatura del suelo a diferentes profundidades con la finalidad de establecer la óptima. Se determinó una profundidad de 3 m como ideal debido a una variacion de 25 y 30% y costo de excavación menor en comparación con profundidades de 6, 9 y 12 m.

Calentamiento geotérmico, Entalpía baja, Sistemas pasivos

Abstract

Saltillo Coahuila, due to the lack of an adequate architectural design, some homes do not meet the thermal environment conditions required during the winter period, it is estimated that 471,725 habitants are affected by temperatures until -3.4°C, which causes morbidity problems, so that the need for the use of electromechanical air conditioning systems with electrical energy consumption of high economic and environmental cost arises. The objective of the work was to study the feasibility of applying a geothermal heat exchanger for home heating. Periodic variation of soil temperature at different depths was studied to determine the optimum by experimentally validated equations. An ideal depth of 3 m was determined due to a variation of 25 y 30% and lower excavation cost compared to depths of 6, 9 and 12 m.

Geothermal heating, low enthalpy, Passive systems

Citación: MOLAR-OROZCO, María Eugenia, RÍOS-ARRIOLA, Juan, BOJÓRQUEZ-MORALES, Gonzalo y REYES-LÓPEZ, Jaime Alonso. M Determinación de profundidad óptima para intercambiadores de calor tierra-aire en Saltillo, Coahuila. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería. 2020. 7-24:1-7.

* Correspondencia del Autor (Correo Electrónico: mariamolar@uadec.edu.mx)
† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Debido a las condiciones climáticas en periodo invernal las viviendas en Saltillo presentan temperaturas con valores menores al límite inferior de confort estimado ($19\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Molar & Velázquez, 2015). Implan Saltillo (2014) indica que, según los resultados de su estudio existe una relación entre ondas gélidas y las temperaturas mínimas de hasta $-3.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, que afectan un total de 142,121 viviendas con 471,725 habitantes ubicados en zona de riesgo alto que presentan diversos efectos ambientales y morbilidad. Por otra parte, es menor la afectación por las ondas cálidas en 57,628 viviendas con 198,767 habitantes con temperatura máximas de $39\text{ }^{\circ}\text{C}$. Por este motivo este trabajo establece prioritariamente como problemática la calefacción de viviendas durante el invierno.

Un intercambiador de calor tierra aire (EAHE, por sus siglas en inglés) está formado por una o más tuberías integradas al subsuelo, con el propósito de circular aire en su interior para ser calentado o enfriado según la temporada del año y posteriormente introducirse en una edificación con propósitos de climatización (Ríos, 2019). Estos sistemas suelen alcanzar altos niveles de eficiencia debido a la poca cantidad de energía que requieren para operar.

Un EAHE representa una alternativa viable para el acondicionamiento térmico de edificaciones bajo varios tipos de clima. Brunat y Escuer (2010) señalan que estos sistemas contribuyen al aumento de temperatura del aire que ingresa a las edificaciones durante el invierno y a la reducción de esta durante el verano. El principio básico es aprovechar la inercia térmica que proporciona la tierra a profundidades entre 1 y 10 m.

Ramírez Dávila *et al.*, (2011) reportan datos de un estudio numérico correspondiente al desempeño de un intercambiador de calor tierra durante un año en tres Ciudades de México (Cd. Juárez, CDMX, y Mérida). Los resultados indican que para Cd Juárez y CDMX el EAHE tiene un mejor desempeño durante la temporada de verano, al disminuir de 6.6 y $3.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la temperatura de salida respectivamente.

En Mérida presentó un mejor comportamiento en el periodo de invernal incrementar la temperatura del aire $3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se concluye que el uso de un EAHE es apropiado para zonas que presentan amplios diferenciales de temperatura entre el ambiente y el subsuelo.

Ríos (2019) realizó un estudio numérico sobre el desempeño de un EAHE para el día más cálido y frío del año en el ejido “Bonfil” ubicado próximo a Santa Rosalía, B.C.S. y comparó diferentes regímenes de flujo ($Re = 100, 500$ y 1500). Los resultados muestran que el número de Reynolds optimo es 500 , presenta una disminución de temperatura de $3.97\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el día más cálido del año y un aumento de $2.81\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el día más frío del año.

Para analizar el desempeño térmico de un EAHE, es imprescindible conocer la variación de temperatura en función de la profundidad y periodo del año, así como considerar el efecto de las variables meteorológicas sobre el comportamiento térmico del subsuelo. Otros factores que influyen directamente son el diámetro, longitud y material de la tubería enterrada (Ríos, 2019).

Existen varios modelos matemáticos para estimar la temperatura del suelo en función de la profundidad y temporada del año. Mihalakakou *et al.*, (1997) utilizaron un modelo basado en la solución analítica de la ecuación de transferencia de calor por conducción en estado transitorio. Este modelo consideró el intercambio de energía convectiva entre el aire y el suelo, la radiación solar absorbida por el suelo, el calor latente por evaporación y la radiación solar de onda larga emitidos por la superficie. El modelo se validó con mediciones experimentales, este modelo puede ser utilizado para predecir el comportamiento de un EAHE.

Ozgener *et al.*, (2013); modelaron analíticamente la temperatura del suelo a diferentes profundidades. Utilizaron como datos de entrada variables calculadas a partir de las mediciones de temperatura ambiente para un sitio en específico. Compararon los resultados con mediciones experimentales y se obtuvo un error próximo al 10% . Se concluye que, a pesar de su simplicidad, esta herramienta puede ser utilizada para la estimación de temperaturas del subsuelo en diferentes ramos de la ciencia.

Fernández (2015); calculó la profundidad límite a partir de la superficie del suelo, donde la influencia directa de la temperatura ambiente, radiación solar, humedad relativa y velocidad de viento deja de tener efecto. Los resultados indican que este límite se encuentra de 1.6 m en adelante. Este estudio fue realizado para climas seco y templado húmedo.

Ríos (2019) calculó la temperatura del subsuelo con un modelo numérico, utiliza como variables de entrada la temperatura ambiente, radiación solar, humedad relativa y velocidad de viento. Se consideran las diferentes capas que componen el subsuelo y sus propiedades térmicas: calor específico, conductividad térmica y densidad. Además, considera la presencia de gradientes térmicos anómalos, típicos en zonas volcánicas.

Lo anterior muestra formas diferentes para realizar el cálculo de la temperatura del suelo en función de la profundidad y el tiempo, proceso inicial para el dimensionamiento de un intercambiador de calor geotérmico como sistema pasivo para climatización de edificaciones. De acuerdo con esto, es posible estimar la temperatura del suelo por medio de métodos analíticos y numéricos. El presente trabajo pretende realizar el cálculo de temperatura del subsuelo por medio de un modelo analítico propuesto por Ozgener *et al.*, (2013) para la ciudad de Saltillo, Coahuila. Las variables de entrada se calcularon con datos del 2017 medidos por una estación meteorológica automática (EMA), los parámetros iniciales se estimaron de la instalación de un intercambiador de calor tierra-aire para climatización artificial en el sector residencial.

Materiales y métodos

Se identificaron las variables requeridas por fórmula, en base a referencias se estableció un criterio de selección de datos.

Diseño de investigación.

El estudio tiene un enfoque cuantitativo, basado en un análisis transversal, con datos obtenidos de un método estimativo (Hernández-Sampieri *et al.*, 2014) (Figura 1).

Figura 1 Diseño de la investigación

Fuente: Elaboración propia

Con el propósito de obtener la difusividad térmica del suelo de Saltillo, Coahuila se realizó un análisis de textura a muestras de suelo recuperadas en una excavación somera. Los resultados obtenidos muestran que el suelo es de tipo franco arcillo arenoso (Figura 2).

Figura 2 Triangulo de texturas para Saltillo

Fuente: FAO

Una vez determinada la clase textural del suelo, se utilizó la correlación experimental reportada por Abu-Hamdeh, 2003 para calcular la difusividad térmica de un suelo.

$$\kappa = -962879w^4 + 280172w^3 + 26746w^2 + 990.17w - 5.5343$$

Donde κ es la difusividad térmica del suelo (m²/s); y w es el contenido de humedad (kg/kg).

Para obtener la temperatura del suelo en función de la profundidad, con la ecuación (1) de Ozgener, Ozgener y Tester (2013):

$$T(z,t) = T_m + A_0 \operatorname{sen} \left[\frac{2\pi}{P} (t - t_0) - \gamma z - \frac{\pi}{2} \right] \tag{1}$$

Donde: T representa la temperatura del subsuelo ($^{\circ}\text{C}$); z profundidad del suelo (m); t tiempo (h), T_m la temperatura media anual del aire ($^{\circ}\text{C}$); A_0 la amplitud de la onda de temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$); P el periodo (h); t_0 el tiempo al cual la temperatura del aire cruza la temperatura media (h); γ representa el inverso de la profundidad de amortiguamiento (m^{-1}), ecuaciones (2) y (3).

$$\gamma = \frac{1}{d} \tag{2}$$

Donde d (m) representa la profundidad de amortiguamiento, y se calcula:

$$d = \frac{1}{\sqrt{\frac{\pi}{\alpha P}}} \tag{3}$$

Donde α representa la difusividad térmica del suelo ($\frac{m^2}{h}$) y P el periodo (h);

Zona de estudio

Saltillo, Coahuila está a 1600 msnm, con latitud 25°22'35" y longitud 101°01'00", presenta un clima seco templado y seco cálido (CONABIO, 2017), figura 3. La estimación del valor de confort térmico de referencia para el periodo frío fue de 22°C, esta se desarrolló con base en ISO 10551 en estudios de campo (Molar & Velázquez, 2015). Este valor coincide con las estimaciones en base ANSI/ASHRAE 55:2010 y con la herramienta diseñada por Luna (2019) donde: la aceptación del 80% + 2.5 °C de temperatura tiene un límite inferior de 21.35 °C, límite superior 26.35 °C.

Figura 3 Ubicación del caso de estudio
Fuente: ANDREW MARSH

Cálculos

Debido a que en este trabajo se pretende conocer la variación anual de temperatura en el subsuelo, es necesario considerar como periodo total el tiempo de un año en horas (365 d = 8760 h), por este motivo en las ecuaciones posteriores el valor de P se considera 8760 h.

El valor de difusividad térmica se obtuvo de la ecuación (1) correspondiente a un suelo arenoso.

$$\kappa = -962879(0.139)^4 + 280172w(0.139)^3 + 26746(0.139)^2 + 990.17(0.139) - 5.5343$$

Obteniendo un valor de $5.5619 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}$, que es utilizado en el primer paso del cálculo para obtener la temperatura del subsuelo, la profundidad de amortiguamiento utilizando la ecuación (3).

$$d = \frac{1}{\sqrt{\frac{\pi}{(1.9512 \times 10^{-3} \frac{m^2}{h})(8760h)}}} \tag{5}$$

Utilizando la ecuación (5) se obtiene un valor de profundidad de amortiguamiento $d = 2.3145 \text{ m}$. Sustituyendolo en la ecuación (2) se obtiene:

$$\gamma = \frac{1}{2.3145 \text{ m}} \tag{6}$$

En acuerdo con la ecuación (6) el valor inverso de la profundidad de amortiguamiento es igual a $\gamma = 0.4320 \text{ m}^{-1}$. Según los datos obtenidos a partir de las mediciones diarias de temperatura de bulbo seco del aire en la EMA, la temperatura media anual fue: $T_m = 20.28^{\circ}\text{C}$, la amplitud de onda de la temperatura $A_0 = 20.05^{\circ}\text{C}$, el tiempo que la temperatura ambiente tarda en cruzar a T_m $t_0 = 72 \text{ h}$. Los valores anteriores son mostrados en la Figura 4.

Figura 4 Determinación de parámetros del modelo teórico A_0 y t_0
Fuente: Elaboración propia

Al sustituir los valores anteriores en la ecuación (1) se obtiene:

$$T(z,t) = 20.28 + 20.05 \operatorname{sen} \left[\frac{2\pi}{8760} (t - 72) - 0.004356z - \frac{\pi}{2} \right] \quad (7)$$

Cabe mencionar que la ecuación (7) se resolvió con un método numérico con la finalidad de realizar un barrido simultáneo de tiempos y profundidades utilizando la sentencia de programación “for”.

Debido a que diferentes autores afirman que la temperatura constante del subsuelo se encuentra a diferentes profundidades [Baver, *et al.*, (1991) T_m a 3 m, Escuer (2008) T_m a 1.5 m, Pacheco (2019) T_m a 15 m], en este trabajo se evaluará la variación de temperatura anual del subsuelo a las profundidades de 1 m, 3 m, 6 m, 9 m y 12 m.

Resultados

A continuación, se presentan los datos obtenidos de la ecuación (7), la variación de la temperatura del subsuelo se analiza seccionada mente en los distintos periodos del año (invierno, primavera, verano, otoño). La temperatura constante T_m en el susbsuelo se encontró a partir de los 12 m.

El principal indicador considerado para determinar la profundidad optima en la instalación de un intercambiador de calor tierra-aire es el porcentaje de variación anual de cada curva de temperatura (1 m, 3 m, 6 m, y 9 m) con respecto a la temperatura constante T_m (12 m), la cual representaría un caso ideal para la instalación y operación de un intercambiador de calor tierra-aire, pero debido a que en la mayoría de los casos existen limitantes financieras y/o técnicas se busca encontrar una profundidad somera con la mayor similitud posible respecto a T_m .

El porcentaje de variación de la temperatura del subsuelo a 12 m de profundidad es casi nulo, es decir, presenta 0% de diferencia entre mínima y máxima. La curva de temperatura en el subsuelo correspondiente a la profundidad de 9 m varia de 5% respecto a la máxima y 0% con la mínima, a una profundidad de 6 m la diferencia es de 10 % respecto a la máxima y 5% con la mínima, a 3 m de profundidad la diferencia es de 30% respecto a la máxima y 25% con la mínima, en cambio el que mantiene un rango de variación mayor es la curva de temperatura a 1 m de profundidad presentando 65% (máxima y mínima) con respecto a la temperatura estable.

Como se mencionó en párrafos anteriores, a una profundidad de 12 m se obtuvo una temperatura constante de $\approx 20^\circ\text{C}$ durante todo el año, esto coincide en mayor medida con los resultados señalados por Pacheco (2019), a los 6 y 9 m también existe una temperatura casi constante con poca variación $\pm 1.5^\circ\text{C}$ y $\pm 0.42^\circ\text{C}$ respectivamente, en todo el periodo (1 año), estas dos profundidades representan un escenario favorable, aunque su determinación depende directamente de la viabilidad técnica y económica.

La variación de temperatura del subsuelo a 1 m de profundidad presenta un comportamiento casi similar a la temperatura del aire ambiente durante todo el año, debido a que a esa profundidad los efectos meteorológicos tienen una influencia considerable. Esto representa un escenario adverso en la etapa de operación de un intercambiador de calor geotérmico, que, según los estudios reportados en la literatura, tienen un mejor desempeño en lugares donde la inercia térmica del subsuelo es alta.

Por lo tanto, en función de los costos y los recursos técnicos necesarios para llevar a cabo una excavación en las inmediaciones de una vivienda de tipo social, se determinó una profundidad óptima de 3 m para la instalación de un intercambiador de calor geotérmico. A esta profundidad la curva de temperatura presenta una variación de $\pm 5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a lo largo del año con respecto a la temperatura constante T_m ($20.27\text{ }^{\circ}\text{C}$) como muestra la Figura 5.

Figura 5 Temperatura del suelo en función de z y t

Conclusiones

La estimación de temperatura en el subsuelo se realizó utilizando un modelo matemático validado experimentalmente, esto representa una herramienta estimativa para el dimensionamiento previo a la instalación de un intercambiador de calor tierra-aire. Aplicado en este caso para una vivienda de Saltillo, Coahuila. Por lo que su utilización puede coadyuvar en caso de no contar con mediciones directas de temperatura en el subsuelo. Este trabajo permitió cumplir con el objetivo de era determinar la profundidad óptima para la instalación de un intercambiador de calor tierra-aire como sistema pasivo de calefacción de viviendas.

Para obtener una estimación con mayor exactitud de la temperatura del suelo en base a la profundidad y el tiempo, es recomendable realizar estudios en sitio sobre las principales clases texturales que componen el suelo, contenido de humedad, densidad, y en medida de lo posible determinar experimentalmente sus propiedades termofísicas.

Este modelo analítico representa una herramienta para la evaluación aproximada de la variación de temperatura en el subsuelo, que evita los costos de perforación e instrumentación. Los autores pretenden realizar una validación experimental que permita comparar los resultados obtenidos en este trabajo.

Agradecimientos

A todo el personal de apoyo en el proceso. Al Dr. Aníbal Luna León de la Facultad de Arquitectura y Diseño, Al Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California por todo lo brindado para la realización de este trabajo. A FONCYT Y CGEPI de la Universidad de Coahuila US, por el financiamiento para la estancia.

Referencias

Abu-Hamdeh, N. H. (2003). Thermal Properties of Soils as affected by Density and Water Content. *Biosystems Engineering* (2003) 86(1), 97–102 doi:10.1016/S1537-5110(03)00112-0

ANS. (2013). Thermal Environment Conditions for Human Occupancy. Recuperado de https://www.ashrae.org/File%20Library/Technical%20Resources/Standards%20and%20Guidelines/Standards%20Addenda/55_2010_opq_Final_08012013.pdf

Baver, L., Gardner, W. & Gardner, W., 1991. *Física de Suelos*. Primera ed. México: Grupo Noriega.

Brunat, I. & Escuer, J., 2010. Intercambiadores tierra-aire y técnicas emparentadas. Ejemplos y experiencias, Lleida: Geoconsultores Técnicos y Ambientales, S.L.

Cabezas, A. M (2012). Eficiencia energética a través de utilización de pozos canadienses con el análisis de datos de un caso real “casa pomaret”. Tesina de master. Barcelona: UPC, pp. 2 a 10, 21 a 24, 54 a 64, 83 a 85, 112 a 115.

Calvache, M. (2002). Manejo del agua: principios fundamentales. Ecuador: VIII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/303691521_MANEJO_DEL_AGUA_PRINCIPIOS_FUNDAMENTALES

Comunicación personal con el Dr. Luna-León A. (2019) profesor de tiempo completo de la UABC, herramienta diseñada en Excel para estimar límite de confort.

CONABIO Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad. (2017) Portal de Geoinformación Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Recuperado de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/layers/clima1mgw>

Escuer, J. (2008). Intercambiadores tierra-aire en la climatización de construcciones. España: Geoconsultores. Acceso libre en PDF.

Fernández, F. (2015). Diseño y caracterización de un sistema intercambiador de calor tierra-aire para obtener confort y ahorro de energía en edificios habitacionales. Tesis doctoral en Diseño Línea de Investigación: Arquitectura Bioclimática. CDMex: Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.

Hernández-Sampieri, R. Fernández-Collado, C, y Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*, Sexta edición, México: Mc Graw Hill.

Implan Saltillo (2014). Atlas de riesgos del municipio Saltillo Coahuila. Informe final. De acceso libre PDF.

López-Alonso, C., Claridge, D. E. & Kreider, J. F. (1995). Analytical Model to Predict Annual Soil Surface Temperature Variation. *Journal of Solar Energy Engineering*; may 1995, Vol. 117/91. Recuperado de <http://solarenergyengineering.asmedigitalcollection.asme.org/> on 01/30/2016.

Molar, M. E. & Velázquez, J. (2015). Análisis de vivienda tipo. Caso Saltillo, Coahuila. *Revista de Prototipos Tecnológicos*. Vol.1 No.1 pp. 1-9.

Ozgener, O., Ozgener, L. & Tester, J. (2013). A practical approach to predict soil temperature variations for geothermal (ground) heat exchangers applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 62 pp. 473–480

Pacheco, I. (abril, 2019) Pozos canadienses: Tecnología natural de bajo coste para climatizar tu casa ahorrando energía. Recuperado de: <https://about-haus.com/como-construir-un-pozo-canadiense/> revisado en agosto 2019.

Pich Aguilera, F. & Batle, T. (2012). Casa Pomaret Manual de Uso, Barcelona: Pich Aguilera Arquitectos.

Ramírez-Dávila, L., Xamán, J., Arce, J., Álvarez, G., & Hernández-Pérez, I. (2014). Numerical study of earth-to-air heat exchanger for three different climates, *Energy and Buildings*, 76, 238-248

Ríos, J. (2019). Análisis de factibilidad para climatización de edificaciones con energía geotérmica de baja entalpía en el ejido "Bonl" Santa Rosalía B.C.S. Tesis de licenciatura. Baja California: Universidad autónoma de baja california, escuela de ciencias de la ingeniería y tecnología.

Rubio, C. (2014). Transient Thermal Flux as a Way to Stimulate the Loss Dormancy on Weed Seeds. *Applied Ecology and Environmental Sciences*. Vol. 2 No. 2, 43-47.

INEGI (2018). Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI) 2018. En el índice 4.42 y 1.1 Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/programas/encevi/2018/default.html#Tabulados>

The U.S. Department of Energy. (2014). PNNL-23479 Prepared for the U.S. Department of Energy under Contract DE-AC05-76RL01830ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2013. Determination of Energy Savings: Quantitative Analysis. Recuperado de https://www.energycodes.gov/sites/default/files/documents/901-2013_finalCommercialDeterminationQuantitativeAnalysis_TSD.pdf