

INVESTIGACIÓN ANALÍTICA Y NUMÉRICA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO PARA DISEÑO DE SISTEMAS DE VENTILACIÓN BASADOS EN INTERCAMBIADORES DE CALOR

Ing. Delia Cohenca, MSc.¹

Ing. David Schwartzman²

RESUMEN: El aprovechamiento del potencial geotérmico de baja entalpia, para refrigeración, pasa por conocer el perfil de la temperatura del suelo y su variación en el periodo en el cual se pretende aprovecharlo. Con esta investigación se logró medir el gradiente de temperatura a través de un sondeo geotérmico, los datos obtenidos, temperatura del suelo en función de la profundidad, permitirá analizar la posibilidad de diseñar y emplear intercambiadores como sistema de refrigeración pasiva de los edificios y así optimizar la eficiencia energética del sistema de refrigeración. Se muestra en este trabajo, que a partir de cierta profundidad y en el lugar de medición, la temperatura del suelo permanece prácticamente invariable durante todo el periodo. A partir de las mediciones realizadas se obtuvo el gradiente de temperaturas del terreno (campus universitario) para las 24 hs del día y durante cinco meses de mediciones a diferentes profundidades. Así mismo, se determinó la conductividad térmica del suelo, se midieron los valores de la humedad y se caracterizaron los tipos de suelo a diferentes profundidades. Desde el punto de vista matemático, se presenta un modelo matemático avanzado de transferencia de calor, para obtener la temperatura del aire a la salida de dichos ductos utilizando las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía.

Palabras clave: Acumulación en el suelo. Intercambiadores tierra-aire. Refrigeración pasiva.

1 INTRODUCCIÓN

El uso del potencial natural del suelo para acondicionar el aire que ingresa a los edificios ha ganado creciente aceptación en los últimos años debido al ahorro económico que se logra en los requerimientos energéticos necesarios para acondicionarlos térmicamente, por lo que el uso de intercambiadores tierra-aire para calentamiento y enfriamiento de edificios e invernaderos ha ido ganando cada vez más peso. El diseño de estos sistemas involucra la optimización de sus características geométricas (flujo de aire, profundidad de los ductos, longitud de los mismos, etc.).

¹ Ingeniera Civil, Magister en Energías Renovables y Desarrollo Dostenible Universidad Nacional de Asunción/Paraguay. E-mail: deliac@ing.una.py.

² Ingeniero Electronico, Universidad Nacional de Asunción/Paraguay. E-mail: david.schwartzman@gmail.com.

Existen varios modelos, simplificados y detallados, que se han propuesto para este propósito (CHEN et al., 1983; SEROA et al., 1985; SANTAMOURIS et al., 1986; LEVIT et al., 1989; MIHALAKAKOU et al., 1994) Además, es necesario conocer el funcionamiento de estos sistemas bajo condiciones reales climáticas (FLORES; LESINO, 2000). Para muchas de las aplicaciones se requiere realizar una estimación de la temperatura del suelo cuando éste no sufre perturbaciones, lo cual resulta extremadamente útil para comprender la naturaleza del problema. La distribución de temperatura del suelo ha interesado a los investigadores por más de un siglo; la *Royal Society* de Edimburgo publicó trabajos de Forbes en 1846, Everett en 1860 y Thomson en 1861.

La predicción de la temperatura del suelo homogéneo sin perturbar se considera ahora un problema clásico de la teoría de conducción de calor para un sólido semiinfinito que tiene una fluctuación periódica de temperatura en su superficie. La variación de temperatura para suelos en capas es mucho más complicada (VAN WIJK; DERKSEN, 1966) y existen en la actualidad numerosos trabajos en el tema. El efecto de la humedad es aumentar la conductividad térmica del suelo. La temperatura que adquiere un estrato de suelo ante el pasaje de un flujo de calor es mayor si el estrato de suelo más caliente posee mayor conductividad calórica pero a la vez menor capacidad calorífica volumétrica (C_v).

Las conclusiones obtenidas por Cuevas et al (2010) señalan que la información adicional aportada por los análisis puede emplearse como una poderosa herramienta a la hora de diseñar de forma optimizada un campo de sondeos geotérmicos. La información referida anteriormente puede completar los datos obtenidos con el método convencional del test de respuesta térmica a la vez que aportar información valiosa para la modelización del comportamiento del suelo.

Por otro lado esta información puede emplearse conjuntamente con las tecnologías de optimización de pozos para de esta forma diseñar los rellenos de sondeos adaptados para la máxima eficiencia de los sistemas. También concluyen que en los resultados de conductividad se ha corroborado que la zona próxima al nivel freático presenta mayor conductividad térmica. Este hecho hace importante que en los sondeos se establezca exactamente el nivel freático y que en los modelos se tenga en cuenta estos aumentos de conductividad.

2 MATERIALES Y METODOS

2.1 Materiales

Se empleó como micro estación un data *logger* de cuatro canales capaz de configurarse

con distintos sensores según las variables que precisen ser monitoreadas. Características: memoria de 512k / inicio e intervalos de muestreo (1 seg. a 18 hs.) programables / memoria no volátil. Datos de muestreo: aproximadamente 512.000 eventos / con *led* de confirmación de operación / autonomía batería: 1 años típico (4 baterías AA estándar) / dimensiones: 89 x 114 x 54 mm.

Se utilizaron dos sensores de temperatura, con una longitud de cable de 17m y 6m, ambos de 12-bit proporciona $\leq \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ total precisión ($\leq \pm 0,36^{\circ}\text{F}$) y la resolución de $\leq \pm 0.03^{\circ}\text{C}$ ($\leq \pm 0.054^{\circ}\text{F}$) durante el intervalo de 0° a 50°C (32° a 122°F). El rango de medición completo es de -40°C a 100°C (-40° a 212°F). El servicio confiable está asegurado por una punta de acero inoxidable y cable sensor robusto clasificado para la inmersión en agua a 50°C durante un máximo de 1 año.

El data *logger* tiene un software de sincronización para el registro de gestión, representación gráfica, *Mac OSX*. Cable USB-*serial*. Los caños de cobre tienen una longitud de 12 m, con un diámetro de 20 mm y un espesor de 1mm. El data *logger* fue instalado en una caseta de mampostería para el efecto.

2.2 METODOLOGIA

Selección del punto de sondeo de acuerdo a la litología representativa del campus, y considerando la proximidad al Centro de datos Meteorológicos de la FPUNA, de manera a obtener valores precisos referentes a temperatura y humedad del ambiente exterior in situ.

Se selecciona el lugar donde se desea explorar el suelo y se procede a armar la pala posteadora para después hincarla sobre el terreno haciéndola girar sobre su propio eje con la ayuda del maneral con el que cuenta la pala en su extremo superior. Las perforaciones fueron realizadas con barreno manual (Figura 1). Se debe tener en cuenta que mientras se hinca la pala posteadora en el terreno es necesario ejercer cierta fuerza sobre el maneral para que el tubo de perforación que se encuentra en el extremo inferior de la pala posteadora penetre efectivamente dentro del suelo, como se observa en la Figura 2.

Se hinca de nuevo la pala dentro de la oquedad realizada con la primera penetración y se realiza una segunda penetración que debe desarrollar aproximadamente otros 25 cm de profundidad. Esta segunda extracción de suelo se considera una muestra representativa a la profundidad “x”. De aquí en adelante el procedimiento se hace iterativo y se detuvo en el momento en que se llegó a la profundidad total (6.80 m). Es necesario hacer notar que conforme se avanzó en la profundidad de la excavación fue necesario añadir tubos de

perforación a la pala posteadora, Figura 3, para lograr alcanzar las profundidades deseadas.



Figura 1 – Perforación de pozo
Fuente: Propia

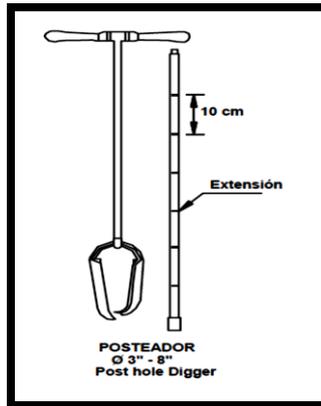


Figura 2 – Instrumentos
para perforación
Fuente: Hurtado (2013)



Figura 3 – Posteador y
Extensión
Fuente: Hurtado (2013)

La primera penetración se debe hacer hasta una profundidad de 25 cm; la pala se retira del interior del terreno girándola un poco en sentido contrario al que se giró la pala cuando se hincó en el terreno y se levanta con fuerza para extraerla del interior del suelo.

Como se observa en la Figura 4, las muestras extraídas a los 3.0; 5.0 y 6.8 m fueron depositadas en recipientes herméticos, fuera del contacto con el sol, de manera a prevenir o minimizar la condensación de humedad. La Figura 5 muestra la instalación de sensores. Ya extraídas e identificadas todas las muestras necesarias del sondeo, se llevaron al laboratorio de suelo de la Facultad de Ciencias Agrarias (UNA) para llevar a cabo las pruebas de densidad y contenido de humedad.



Figura 4 – Toma de muestras
Fuente: Propia



Figura 5 – Instalación de sensores
Fuente: Propia

El pozo ha sido encamisado en cobre de 20mm para evitar derrumbe e instalar las sondas de temperatura (sensores).

Registro de la temperatura en el tiempo a diferentes profundidades del sonde Para llevar a cabo estas medidas se instalan dos sondas de tipo termopar con errores de medida de $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$. En la Figura 6 se esquematiza el sistema de termopares que se encuentran conectados a un registrador de datos (*data logger*) que consigue el almacenamiento de temperatura a las distintas profundidades con un intervalo temporal programado de 15 minutos. La distancia entre sondas se mantuvo igual a un metro durante todo el procedimiento.

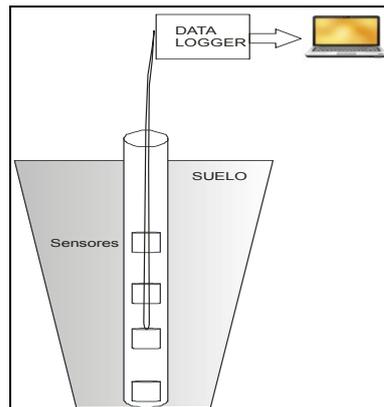


Figura 6 – Esquema de mediciones
Fuente: Propia

Semanalmente se descargan los datos registrados en el data logger a una notebook y se almacenan en archivos individuales.

En relación a los datos meteorológicos, se utilizaron los datos proporcionados por la estación meteorológica de la Facultad Politécnica, que registra la temperatura externa, humedad relativa, temperatura del suelo (superficial), con intervalos de 10 minutos.

Fechas de las mediciones y niveles:

- a. Primer Nivel: Inicio de las mediciones (previa calibración de los sensores) 15 de agosto (0:00hs), profundidad sensor 1: 6.8 m; sensor 2: 5.8 m.
- b. Segundo Nivel: inicio de las mediciones el 12 de octubre, profundidad sensor 1: 5.80 m y sensor 2: 4.80 m.
- c. Tercer Nivel: Inicio de las mediciones 9 de noviembre, profundidad sensor 1: 4.00 m y sensor 2: 3.00 m.

3 RESULTADOS Y DISCUSION

El perfil geológico presenta desde la superficie actual hasta una profundidad aproximada de 0.70m un material de relleno. Subyacente a este material, y hasta la finalización del sondeo, se encuentran unas arenas finas a medias cementadas muy densas con

matriz arcillosa. Estas arenas cementadas están caracterizadas por su alta resistencia a la penetración del sacamuestras, lo que dificulta la extracción de muestras.

El suelo conformado por arcillas arenosas de consistencia muy dura, presenta rechazo a los 6.80 mts. Se observan arcillas arenosas de tonos pardo amarillentos y rojizos.

No se registro actividad freática hasta la profundidad alcanzada.

En la Tabla 1 se muestran los valores de humedad natural proporcionado por el laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias (UNA). En cuanto a la densidad de las muestras, determinadas por el mismo laboratorio dieron un resultado de 1.4 g/cm³.

Tabla 1 – Contenido de humedad de las muestras

Sondeos	Profundidad (m)	Humedad (%)*
Sondeo 1	3.00	18.30
Sondeo 2	5.00	13.90
Sondeo 3	6.80	17.60

Fuente: Propia

Nota: gramos de agua/100 gramos de suelo

- a. Primer Nivel de Medición – en el **primer nivel** se obtuvieron 4.160 lecturas de ambos sensores situados a -6.80m y -5.80 m, estos datos se han comparado con los registros de la temperatura ambiente, obtenidos de la estación meteorológica, situada a 20 m del sitio de exploración. En la Figura 7, se puede observar la variación de la temperatura durante todo el periodo de registro, es mínima y casi estable. La desviación estándar σ y la varianza, son parámetros que caracterizan la dispersión de los datos alrededor del promedio Cuando más concentrada esté la distribución de valores alrededor de la media, menor será σ , y viceversa.

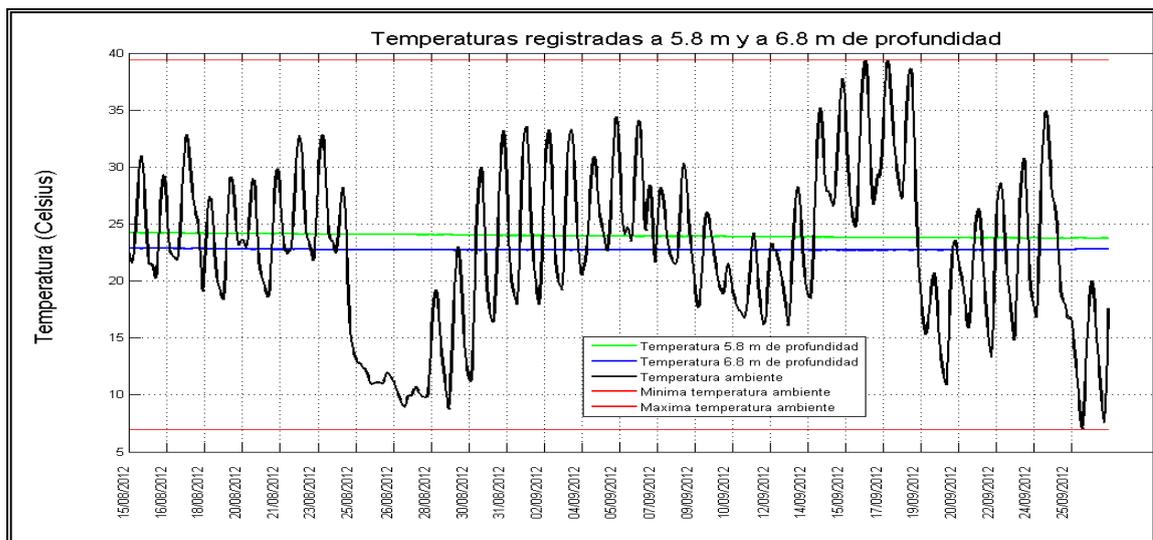


Figura 7 – Registro de temperaturas del 1er. Nivel

Fuente: Propia

En la Tabla 2 se presentan los valores de temperatura máximos y mínimos medidos para ambos sensores y el promedio correspondiente a todos los registros obtenidos, así como la desviación estándar, durante el periodo de medición.

Tabla 2 – Resumen de mediciones Primer Nivel

Sensores	Profundidad mts	Máxima °C	Mínima °C	Media °C	Desv. Est.
Sensor 1	6.8	24.243	23.689	23.949	0.145
Sensor 2	5.8	22.872	22.681	22.737	0.039
Sensor externo		40.000	5.900	22.480	7.019

Fuente: Propia

b. Segundo Nivel de Medición – para el segundo nivel se obtuvieron 2.703 lecturas de ambos sensores situados a -5.80 y -4.80 m, respectivamente y comparados con la temperatura ambiente registrada por la estación meteorológica. En la Figura 8 se representan las temperaturas registradas para el segundo nivel, así como la temperatura ambiente máxima y mínima registrada en el periodo de referencia.

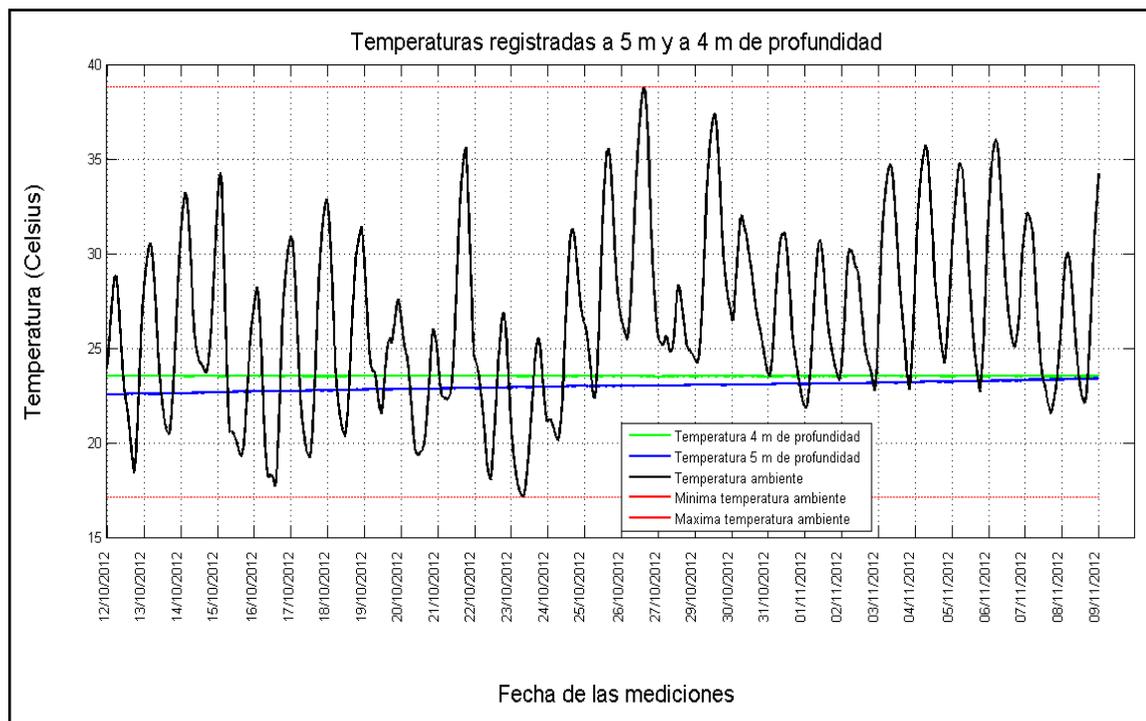


Figura 8 – Temperaturas segundo nivel

Fuente: Propia

En la Tabla 3 se presentan los valores de temperatura máximos y mínimos medidos para ambos sensores y el promedio correspondiente a todos los registros obtenidos durante el periodo de medición.

Tabla 3 – Resumen de mediciones Segundo Nivel

Sensores	Profundidad mts	Máxima °C	Mínima °C	Media °C	Desv. Est.
Sensor 1	5.8	23.569	23.448	23.508	0.016
Sensor 2	4.8	23.400	22.537	22.963	0.225
Sensor externo		40.100	15.500	26.380	4.840

Fuente: Propia

- c. Tercer Nivel de Medición – para el tercer nivel se obtuvieron 844 lecturas de ambos sensores situados a -4.0 y -3.0 mts, respectivamente y comparados con la temperatura ambiente registrada por la estación meteorológica. En la Figura 9 se representan las temperaturas registradas para el tercer nivel, así como la temperatura ambiente máxima y mínima registrada en el periodo de referencia.

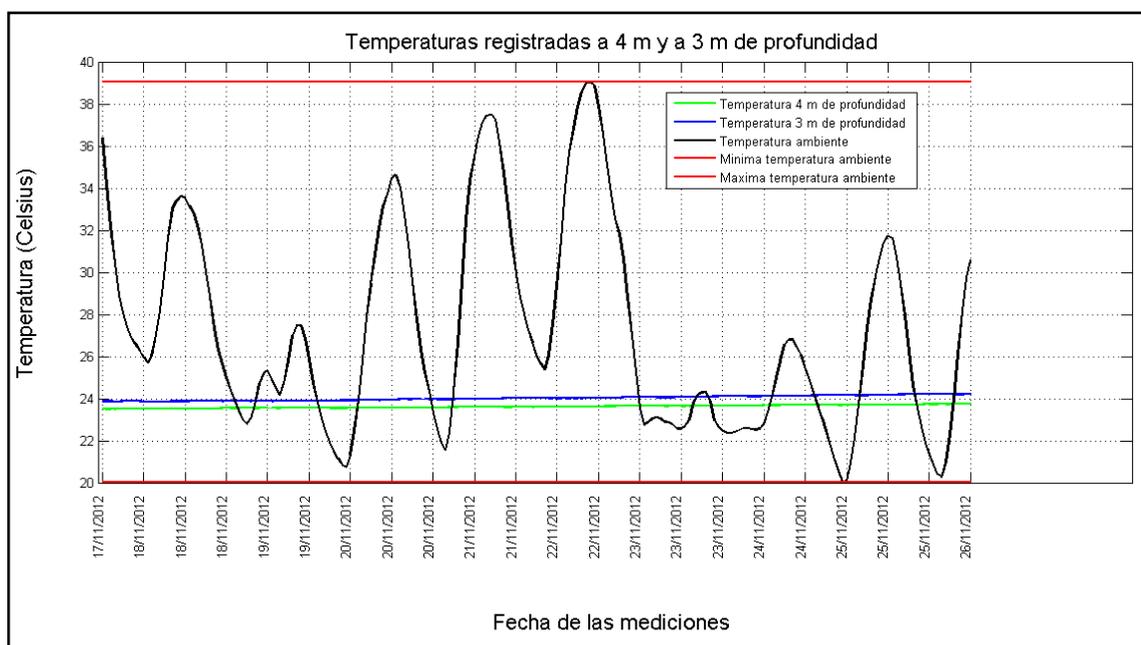


Figura 9 – Temperaturas Tercer Nivel

Fuente: Propia

En la Tabla 4 se presentan los valores de temperatura máximos y mínimos medidos para ambos sensores y el promedio correspondiente a todos los registros obtenidos durante el periodo de medición.

Tabla 4 – Resumen de mediciones Tercer Nivel

Sensores	Profundidad mts	Máxima °C	Mínima °C	Media °C	Desv. Est.
Sensor 1	4	23.737	23.497	23.613	0.068
Sensor 2	3	24.219	23.857	24.013	0.110
Sensor externo		40.000	19.300	27.36	5.2058

Fuente: Propia

En la Figura 10 se presenta los promedios registrados de las temperaturas medidas conforme la profundidad (línea azul), y la línea que corresponde a la interpolación temperatura/profundidad (línea verde), así mismo las líneas de convergencia superior e inferior que están entre 23°C y 22.5°C a los 7 m.

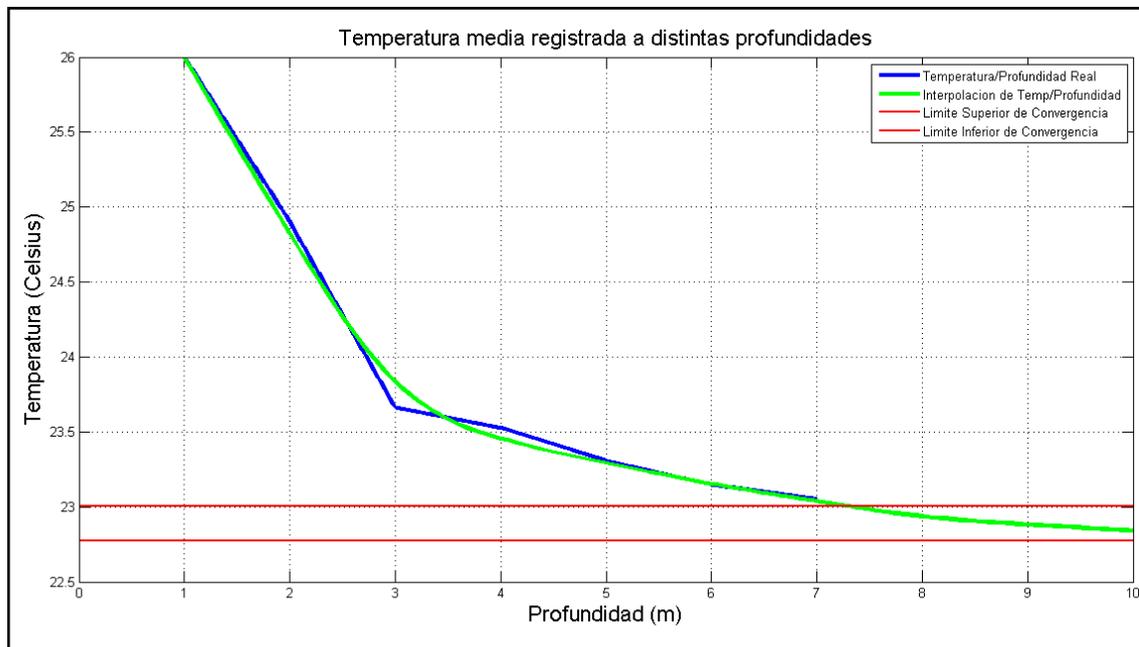


Figura 10 – Temperatura media registrada a distintas profundidades
Fuente: Propia

En cuanto a los parámetros climáticos a nivel local, en la Tabla 5 se presentan los promedios de los parámetros climáticos (temperatura) obtenidos entre los años 1971 y 2000 y publicados por la Organización Meteorológica Mundial. La temperatura diaria promedio anual es de 23,3°C.

Tabla 5 – Parámetros climáticos promedio

Parámetros climáticos promedio de Central													
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Temperatura diaria máxima (°C)	34	33	31.6	28	25	23	23	25	26	29	31	32	28.4
Temperatura diaria promedio (°C)	28	27	26.4	23	20.4	18	18	20	21	24	25	27	23.3
Temperatura diaria mínima (°C)	23	22	21.3	19	15.7	14	13	14	16	19	20	22	18.2

Fuente: OMM

Estos valores se ven representados gráficamente en la Figura 11.

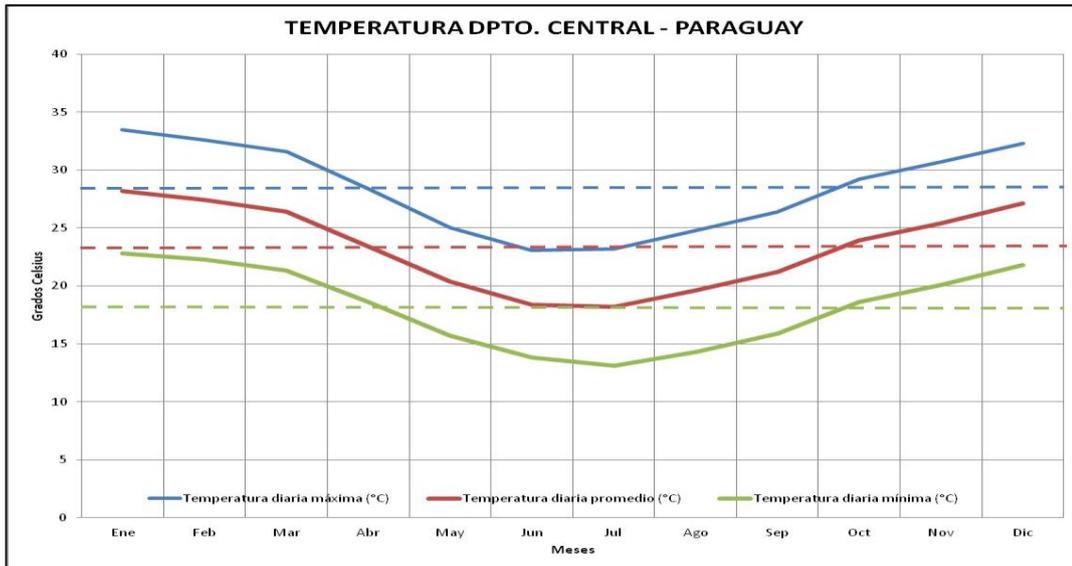


Figura 11 – Promedio de Temperaturas Dpto. Central
Fuente: Dirección Nacional de Meteorología (1971-2000)

En línea de puntos se indican los valores anuales promedio respectivamente.

3.1 Estimaciones analíticas y numéricas

Para modelizar los ductos es necesario realizar algunas hipótesis sobre del flujo de aire dentro de los mismos, de forma de simplificar las ecuaciones y su consecuente resolución. El flujo dentro de los ductos se considera transitorio y unidimensional, es decir, se usan valores promedio de la velocidad, presión y temperatura en cada una de las áreas transversales del flujo.

Las ecuaciones que se utilizan son las tradicionales ecuaciones de continuidad o conservación de la masa, conservación de la cantidad de movimiento y conservación de la energía en la dimensión y . (LARSEN; LESINO, 2001).

Conservación de la masa (Ecuación 1):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Conservación del momento (Ecuación 2):

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\tau_w L}{S} \quad (2)$$

Conservación de la energía (Ecuación 3):

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v H)}{\partial y} = \frac{q_w L}{S} \quad (3)$$

Ecuación 4 de estado:

$$P = R\rho T \quad (4)$$

en donde ρ es la densidad del fluido en kg/m^3 , v es la velocidad en m/s , P la presión en Pa, H la entalpía total en J/kg , L el perímetro del ducto en m, S el área transversal de flujo en m^2 , τ_w el esfuerzo de corte en la pared en kg/ms^2 y q_w el flujo de calor en W/m^2 en el sistema vía las paredes del ducto. La entalpía total H está definida como $H = h + v^2/2$, en donde h es la entalpía específica en J/kg .

En adición a las ecuaciones anteriores, se utiliza la ecuación de estado para gases ideales (4), que relaciona la presión P con la temperatura T y la densidad ρ . La constante R se define como una constante universal Λ cuyo valor es $8.31 \text{ J/mol}^\circ\text{K}$ dividida por el peso molecular del gas. El peso molecular del aire se toma como 28.964 g/mol , de acuerdo a la definición de atmósfera estándar. Con estas características, la constante R toma el valor $286.91 \text{ J/kg }^\circ\text{K}$.

Al utilizar la ecuación de Kusuda et al. (1965) para representar las distribuciones de temperatura ambiente y del suelo, y considerando $\alpha=0.52 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}$ (suelo seco y compacto), se presenta en las Figuras 12 y 13, la evolución anual de la temperatura del terreno con la profundidad.

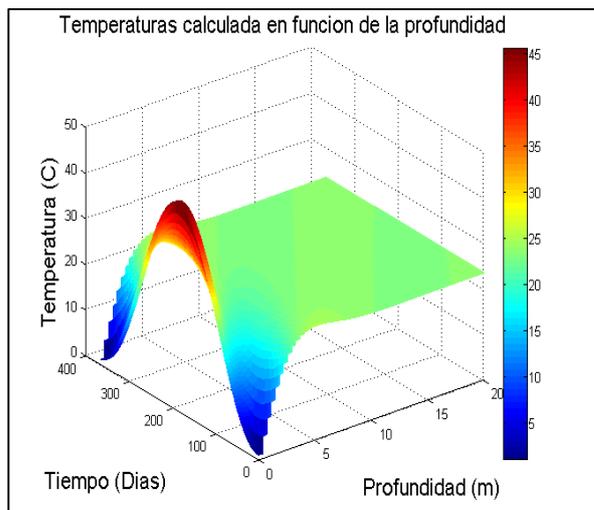


Figura 12 – Evolución anual de la temperatura del terreno con la profundidad
Fuente: Propia

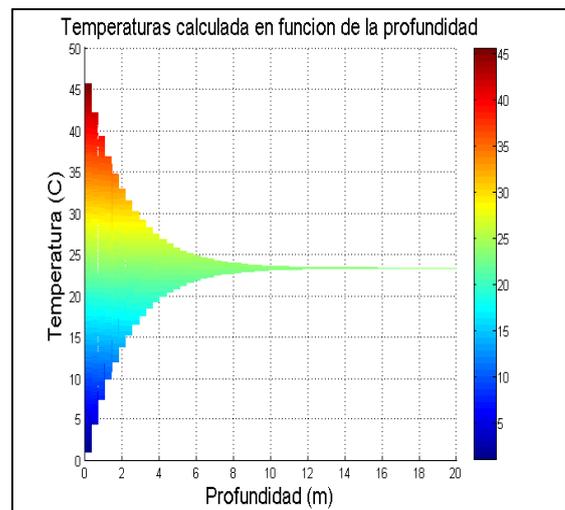


Figura 13 – Evolución anual de la temperatura del terreno con la profundidad
Fuente: Propia

Como se puede apreciar, en ambas Figuras 12 y 13, la temperatura del suelo se vuelve estable, independientemente de la época del año, por tanto podemos afirmar que esta simulación se aproxima con mucha exactitud a los datos medidos, en la Figura 14 se representa tres casos particulares considerando la temperatura exterior igual a 45°C, 39°C y 26°C, en cualquiera de los casos a partir de los 6m de profundidad la temperatura se estabiliza alrededor de los 24°C.

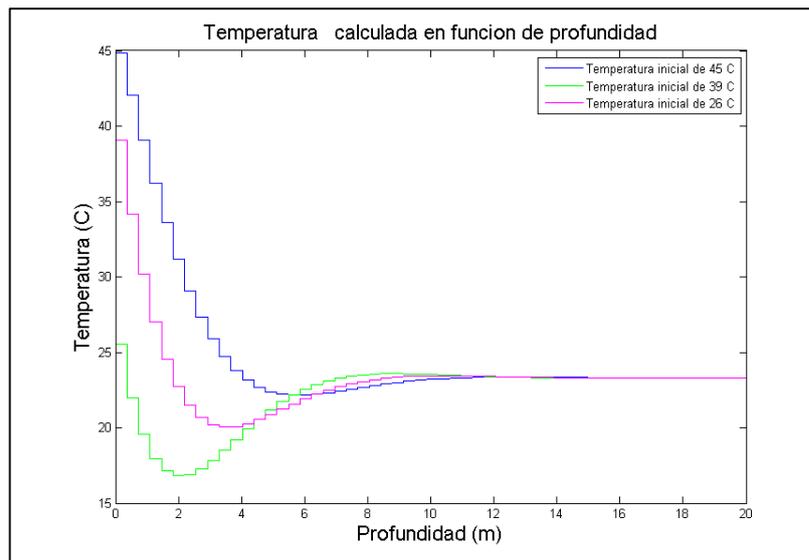


Figura 14 – Temperatura del suelo en función de la profundidad
Fuente: Propia

Se pueden diferenciar tres zonas distintas según la variación de la temperatura del terreno con la profundidad. La primera zona, o zona superficial, comprende desde la superficie de la tierra hasta la profundidad de un metro, y es una zona donde la temperatura del terreno es muy sensible a cambios en las condiciones ambientales.

La segunda zona es la que se extiende hasta unas profundidades entre 8 metros, (puede llegar a los 20 m según el tipo de terreno), y donde la temperatura del terreno es cercana a la temperatura media anual ambiental. Por último, (POPIEL et al., 2001) a profundidades superiores a los 50 metros, la temperatura aumenta con la profundidad del terreno con un gradiente medio de 0,03 °C/m como consecuencia del gradiente geotérmico (temperaturas en la corteza terrestre debidas al flujo de calor interior).

Existen estudios que demuestran, para distintos tipos de terreno, que la temperatura de la tierra permanece prácticamente constante por debajo de una cierta profundidad a lo largo del año, siendo su valor inferior a la temperatura ambiental en verano y superior en invierno (MIHALAKAKOU et al., 1997).

En la Figura 15, se presenta la distribución normal correspondiente las diferentes profundidades y la distribución de los promedios.

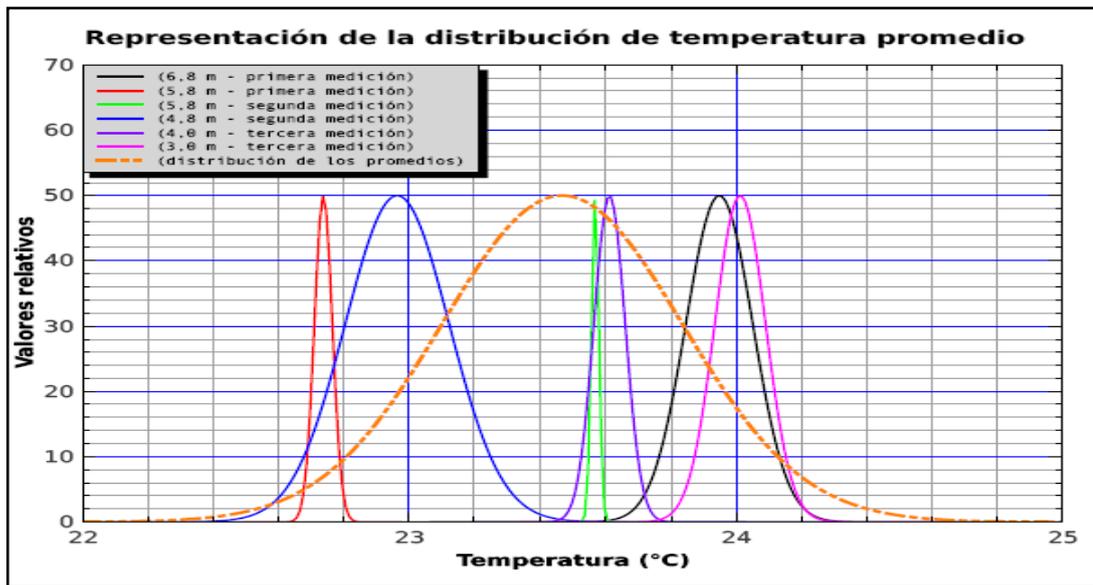


Figura 15 – Distribución Normal
Fuente: Propia

Los resultados obtenidos en las mediciones realizadas demuestran que a partir de los 4m la temperatura del suelo se mantiene estable, independientemente a la temperatura ambiente, y que ese valor de 23.5°C es aproximadamente igual a la temperatura promedio anual, 23.3°C según datos de la OMM. No se ha detectado napa freática en el sitio de la perforación.

El suelo del sitio es compacto, con rastros de óxido ferroso, con bajo porcentaje de humedad y densidad 1.4 gr/cm³. El suelo tiene una capacidad calorífica alta entre 0.27 y 0.80 cal/g/°C, lo que significa que es un buen acumulador de calor, y una baja conductividad térmica (0.0017 J/°C/cm/seg), que hace que la penetración del calor en el suelo sea lenta, al igual que su enfriamiento.

El modelo propuesto asume que el flujo dentro de los ductos presenta una simetría de revolución con respecto al eje principal del ducto, y que la presencia de los ductos no afecta significativamente a la distribución de temperaturas del suelo y que las propiedades del mismo son uniformes.

En el modelo propuesto, se observa que la transferencia principal de calor se da entre las paredes del ducto y el aire que circula en su interior. A modo de ejemplo de la aplicación del modelo, se establece la temperatura promedio de entrada de un corte seccional del ducto es de 32°C y la temperatura de salida objetivo (deseada) de un corte seccional del mismo es de 23°C. La profundidad de tomada en este modelo es de 10 m, y el diámetro del ducto de 125

mm.

Se pretende con este modelo estimar el largo total que debe tener el ducto. El conjunto de ecuaciones diferenciales parciales es discretizado en una malla uniforme utilizando la técnica de las diferencias finitas. Se establecen condiciones de Neumann en las paredes del producto, y en la sección transversal del origen del ducto se asumen condiciones de *Dirichlet*, fijando una temperatura constante de entrada de 32o C.

A continuación se pueden observar las figuras de los resultados que se obtuvieron para hacer una estimación del largo total del ducto. La Figuras 16, 17 y 18 representan la transferencia de calor en un corte seccional del ducto a una distancia sobre el eje principal de 6 m.

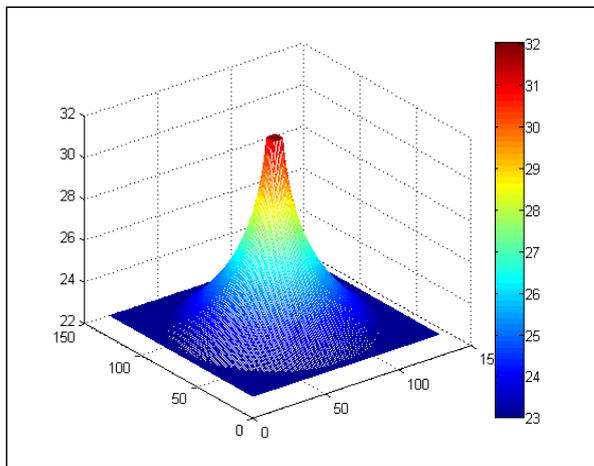


Figura 16 – Transferencia de calor en función de la temperatura y diámetro del tubo
Fuente: Propia

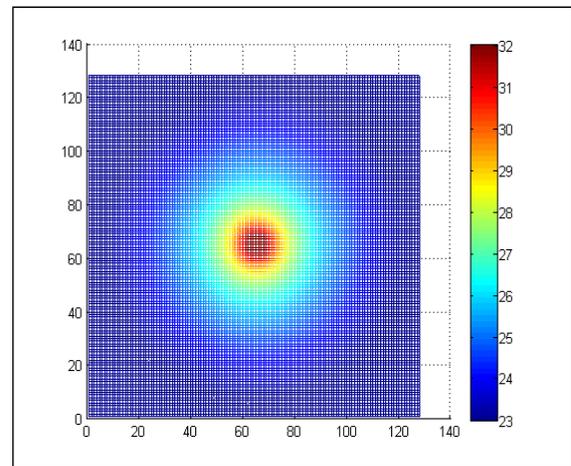


Figura 17 – Corte Seccional XY
Fuente: Propia

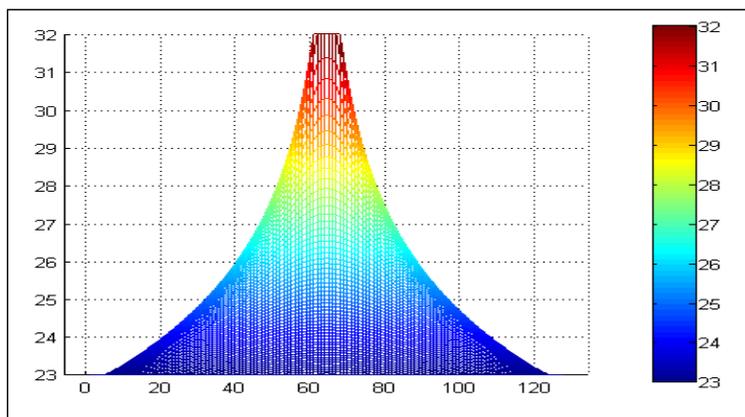


Figura 18 – Corte Seccional XZ
Fuente: Propia

En cuanto a la validación de modelo propuesto para la relación entre las variables: temperatura y la profundidad a lo largo del año, en la Figura 19, se puede verificar que el modelo se ajusta a los valores reales medidos in situ.

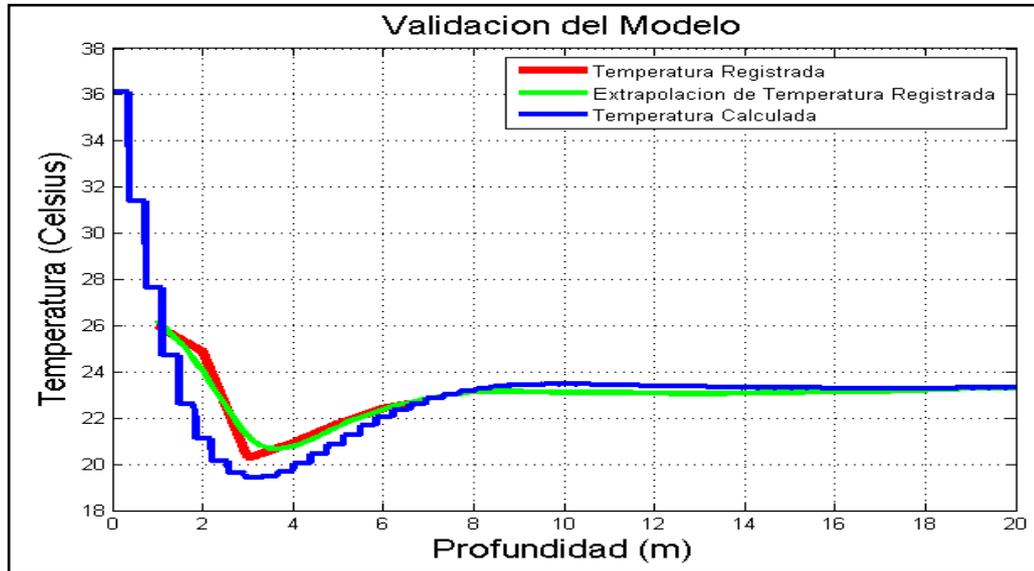


Figura 19 – Validación del modelo Kusuda
Fuente: Propia

Considerando que el modelo matemático utilizado se valida con los valores registrados in situ, es posible utilizar este modelo matemático para optimizar el diámetro, material, longitud de los conductos y velocidad del aire para enfriamiento de aire.

4 CONCLUSIONES

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. 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 a 1.0 m, 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 este estudio, esta temperatura es del orden de 23.5°C. Lo interesante es que esta temperatura es muy próxima a la temperatura de confort a lo largo de todo el año. La gran masa y capacidad térmica del suelo posibilita utilizarlo como sumidero y fuente de

energía, tanto para refrigeración como para calefacción.

La caracterización térmica del suelo ofrece herramientas que ayudan a incrementar el grado de conocimiento de las propiedades térmicas enfocadas fundamentalmente en determinar la respuesta térmica, ante diferentes escenarios de inyección o extracción de calor.

A una profundidad del orden de 3.5 m, se produce estabilización de la temperatura en torno de los 23.5°C. En verano, a esta profundidad, encontramos el terreno más frío que su valor medio anual (28.4°C) y viceversa, en inviernos esta zona del suelo está más caliente ($T_i=18.2^\circ\text{C}$). 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.

El modelo obtenido resulta ser una herramienta adecuada de diseño que permite obtener las dimensiones y características óptimas de trabajo de los ductos, y la aplicación de la ecuación de Kusuda et al. (1965) refleja los valores de las mediciones realizadas.

Por tanto, 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.

ANALYTICAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE CHARACTERISTICS OF THE SOIL FOR DESIGNING VENTILATION SYSTEMS BASED ON HEAT EXCHANGERS

ABSTRACT: The use of low enthalpy geothermal potential, refrigeration happens to know the profile of the soil temperature and its variation in the period in which it intends to use it. This research was able to measure the temperature gradient through a geothermal survey, the data obtained on soil temperature a function of depth, allow to analyze the possibility of designing and using exchangers as passive cooling of buildings and thus optimize energy efficiency of the cooling system. It is shown in this work, after a certain depth and the measurement site, the soil temperature remains virtually unchanged throughout the period. From the measurements was obtained ground temperature gradient (university campus) for 24 hours a day, for five months of measurements at different depths. Also, the soil thermal conductivity was determined, measured humidity values and characterized soil types at different depths. From mathematical perspective, present an advanced model of heat transfer for air temperature at the exit of the ducts using the conservation equations of mass, momentum and energy.

Keywords: Earth-to-air heat exchangers. Passive cooling. Soil storage.

BIBLIOGRAFIA

CHEN, B.; WANG, T.; MALONEY, J.; NEWMAN, M. Measured and predicted cooling performance of earth contact cooling tubes. **Proceedings...**, ASES: Annual Meeting, Minneapolis, USA, 1983.

CUEVAS C.; J.M. et al. **Propiedades térmicas de los suelos para el dimensionado y diseño del sistema subterráneo mejorando la eficiencia energética de sistemas geotérmicos en climatización**. Instituto Tecnológico de la Construcción, UTM Alicante, España, 2010.

FLORES LARSEN, S.; LESINO, G. 2000. Modelización de intercambiadores tierra-aire para acondicionamiento térmico de edificios. **Proceedings...**, Actas del 8º Congreso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia (LATCYM 2001), p. 317-323, Veracruz, México, 2001.

FLORES LARSEN, S.; LESINO, G. Aplicación para la ciudad de Salta de un modelo de distribución horaria de temperatura. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Argentina**, v. 3, n. 2, p. 11.25-11.28, 1999.

FLORES LARSEN S.; LESINO G. Programa de diseño y simulación de edificios. **Proceedings...**, Actas del XI Congreso Ibérico y VI Congreso Iberoamericano de Energia Solar, Vilamoura, Portugal, 2002.

FLORES LARSEN S.; LESINO, G. 2001. A new code for the hour-by-hour thermal behavior simulation of buildings. **Proceedings...**, Seventh International IBPSA Conference on Building Simulation, p. 75-82, Río de Janeiro, Brasil, 2001.

HURTADO, J.A. Website, 2013. Disponible em: <<http://www.jorgealvahurtado.com/>>

KUSUDA T.; ACHENBACH, P.R. Earth Temperature and Thermal diffusivity on at Selected Stations in the United States. **Proceedings...**, ASHRAE Trans, v. 71, p. 61-75, 1965.

LEVIT, H.; GASPAR, R.; PIACENTINI, R. Simulation of greenhouse microclimate by earth-tube heat exchangers. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 47, p. 31-47, 1989.

MAGRANER BENEDICTO, T. **Validación Experimental de los Métodos de Diseño de Instalaciones de Bomba de Calor Acoplada al Terreno**. Tesis Doctoral, Universidad Politecnica de Valencia, España, 2010.

MIHALAKAKOU G.; SANTAMOURIS M., LEWIS O.; ASIMAKOPOULOS D. On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles. **Solar Energy**, v. 60, n. 3/4 p. 181-190, 1997.

MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D. Modelling the thermal performance of earth-to-air heat exchangers. **Solar Energy**, v. 53, n. 3, p. 301-305, 1994.

POPIEL, C.; WOJTKOWIAK, J.; BIERNACKA, B. Measurements of temperature distribution in ground. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 25, p. 301-309, 2001.

SANTAMOURIS, M.; ARGIRIU, A.; VALLINDRAS, M. 1994. Design and operation of a low energy consumption passive solar agricultural greenhouse, **Solar Energy**, v. 52, n. 5, 1994.

VAN WIJK, W.R.; DERKSEN, W.J. Thermal properties of a soil near the surface. Laboratory of Physics and Meteorology of the Agricultural University, Wageningen The Netherlands. **Agricultural Meteorology**, v. 3, n. 5/6, p. 333-342, 1996.

Originals recebidos em: 22/02/2013

Aceito para publicação em: 15/08/2013