

AJUSTE LINEAL DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE RESPUESTA TÉRMICA DE SUELO DEL SERPENTIN HORIZONTAL - SAN LUIS – ARGENTINA-

V. Stefanini, J. Leporati, R. Guaycochea, D. Nazario

Proyecto de Investigación: “Aplicaciones en San Luis de Energía Eólica, Biomasa y Geotermia de Baja Entalpia”

Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias – Universidad Nacional de San Luis - Ruta 148
Extremo Norte C.P. 5730 Villa Mercedes – San Luis.

E-mail: stefanini28@hotmail.com.ar, elmundial@hotmail.com, rguaycochea@gmail.com

Recibido 13/08/16, aceptado 10/10/16

RESUMEN: Este trabajo se realizó con el objeto de aplicar un análisis estadístico de regresión lineal simple y múltiple para un **Test de Respuestas Térmicas in situ**; En dicho ensayo se determinaron los valores de la conductividad térmica efectiva del subsuelo λ_{eff} , y la resistencia térmica R_b , correspondiente a un sistema horizontal de intercambiador particular de calor.

Estos ensayos in situ se basan en el modelo de la fuente de línea infinita (ILS), de transferencia de calor por conducción térmica de kelvin; Los valores se obtuvieron por el método gráfico de la pendiente y posteriormente se realizó el estudio estadístico.

Palabras clave: Regresión lineal simple y múltiple, test de respuesta térmica, intercambiador horizontal, método de la pendiente.

INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente trabajo es poder determinar el grado de ajuste del coeficiente de conductividad térmica efectiva del subsuelo λ_{eff} , obtenida en el segundo ensayo de respuesta térmica de suelo in situ realizado en San Luis, Argentina, utilizando un intercambiador de calor horizontal.

Con el ensayo de respuesta térmica, se determinó las características de subsuelo para un caso en particular, para luego poder acoplar una bomba de calor geotérmico.

Este ensayo es el tercero realizado en Argentina, como así también el segundo realizado en la Ciudad de San Luis utilizando un intercambiador de calor horizontal; Dicho intercambiador fue adecuado a una excavación ya existente para otro fin, por ello es que sus características son diferentes.

Las bombas de calor geotérmicas (GSHPs) (ground source heat pumps) son sistemas eficientes para la calefacción y refrigeración de edificios, ampliamente usados en Europa y EE.UU; Estos consisten en acoplar una unidad de bomba de calor y un grupo de intercambiadores de calor de pozo (BHEs) (borehole heat exchangers); Las mejoras que se pueden realizar a estos equipamientos de bomba de calor geotérmico, están centradas en la optimización del mismo y en la reducción de los costos de instalación; Como estos costos de instalación pueden ser elevados, antes de poner en marcha esta construcción se necesita realizar el cálculo y la simulación para la optimización del mismo; Para ello se deben conocer dos parámetros que afectan la eficiencia del depósito de calor,

los cuales se deben determinar entre el fluido portador de calor y la pared del pozo, ellos son: la conductividad térmica efectiva del subsuelo λ_{eff} , y la resistencia térmica de subsuelo R_b .

Estos valores se determinaron mediante un Test de Respuesta Térmica (TRT) in situ, que consiste en hacer circular un fluido portador de calor a través de un intercambiador de calor geotérmico, por algunos días y determinar la temperatura de entrada y de salida del sistema.

El Test de Respuesta Térmica (TRT) horizontal con condiciones particulares, se realizó en la provincia de San Luis, Departamento Pueyrredón, en la República Argentina, en el mes de abril del 2013.

El primer ensayo, también se realizó en la ciudad de San Luis, a fines del mes de marzo y comienzos del mes de abril del 2012.

MODELO MATEMÁTICO

El test de respuesta térmica, se realizó en un pozo individual con una tasa de inyección de calor constante y se basó en un modelo teórico en el cual no se tiene en cuenta cómo afectan los pozos cercanos y además que la inyección de calor que reciben no es una constante.

Se denomina gradiente geotérmico al aumento de temperatura del suelo con el aumento de profundidad.

El campo de temperatura que en condiciones normales existe por debajo de la superficie del suelo se lo considera estacionario, cuando el gradiente geotérmico no varía con el tiempo, ni aun con los cambios de temperatura estacionales que afectan la superficie del terreno, esta no variación de la temperatura se produce a una profundidad de 10 a 15 metros.

Ahora cuando inyectamos calor en un pozo de sondeo, el campo de temperatura comienza a variar y cuanto más calor se inyecta al pozo, más caliente se vuelve el suelo, por lo cual la temperatura de suelo no perturbado se encontrara a una distancia mayor del pozo.

Ahora si el calor inyectado es constante, el campo de temperatura serán nuevamente estacionario, pero tardara como mínimo de 20 a 25 años.

Cuando nosotros inyectamos calor en el suelo, se genera un proceso térmico al cual lo podemos dividir en tres partes:

PROCESO TRANSITORIO: Cuando se registra un aumento de la temperatura del suelo.

PROCESO ESTACIONARIO: Cuando ya no registramos un aumento de temperatura de suelo, en ese momento la velocidad de transferencia de calor del suelo al medio ambiente se iguala a la velocidad de inyección de calor en el suelo.

UN PULSO: Cuando se produce una variación del calor de inyección y se superpone al proceso estacionario.

El pulso no conduce a un estado estacionario ya que el mismo es limitado en el tiempo, y se superpone a la temperatura estacionaria media T_r . Mientras que un proceso transitorio el aumento de temperatura es superpuesto a la temperatura de suelo no perturbado T_{sur} , esto diferencia al pulso del proceso transitorio. (Eklöf C, Gehlin S. 1996; Gehlin, S. and Nordell, B. 1997)

LA LÍNEA COMO FUENTE DE ENERGIA

Este modelo supone que la fuente de calor es infinitamente pequeña en comparación con su largo, por lo tanto se asemeja a una línea, dentro de la cual el flujo de calor es radial y la influencia de los

extremos es despreciable. (Ingersoll, L.R., Plass, H.J. 1948; Hellström, G. 1997; Austin III, W. A., 1998; Eklöf C, Gehlin S. 1996; Gehlin, S. and Nordell, B. 1997; Busso A., Reuss M., Müller J., Sograrí N. 2000; Busso A., Reuss M., 2000)

La temperatura de suelo viene dada por:

$$\Delta T(r,t) = \frac{Q_L}{4\pi\lambda} \int_{r^2/4\alpha t}^t \frac{e^{-u}}{u} du \quad (1)$$

Para un:

$$\frac{\alpha t}{r^2} \geq 5 \quad (2)$$

Con un error máximo del 2%, se tiene:

$$\int_{r^2/4\alpha t}^t \frac{e^{-u}}{u} du = \ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) - \gamma \quad (3)$$

Reemplazando en [1], se tiene:

$$\Delta T_f^q(t) = \frac{Q_L}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4\alpha t}{r_b^2}\right) - \gamma \right] + Q_L R_b \quad (4)$$

Donde:

ΔT_f^q : Cambio de la temperatura T del fluido calo portador por la inyección de calor.

α : Difusividad térmica

Q_L : Velocidad de inyección de calor por unidad de longitud de la perforación

λ : Conductividad térmica de suelo

R : Radio de la perforación (m)

t : tiempo

r : Radio de la línea en el modelo

γ : 0,5772 (Const. de Euler)

Ordenando:

$$\Delta T_f^q(t) = \frac{Q_L}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4\alpha}{r_b^2}\right) + \ln t - \gamma \right] + Q_L R_b \quad (5)$$

$$\Delta T_f^q(t) = \frac{Q_L}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4\alpha}{r_b^2}\right) - \gamma \right] + Q_L R_b + \frac{Q_L}{4\pi\lambda} \ln t \quad (6)$$

Si el flujo de energía térmica por unidad de largo QL es constante tenemos una ecuación que responde a la ecuación de una recta.

Ecuación de la recta:

$$y=b+mx \quad (7)$$

Donde:

x,y: son variables en un plano cartesiano

m: pendiente de la recta y está relacionada con la inclinación que toma la recta respecto a un par de ejes que definen el plano

b: es el término independiente u ordenada de origen y es el valor del punto en el cual la recta corta al eje vertical en el plano

Entonces nos queda:

$$\Delta T_f^q(t)=b+m \ln t \quad (8)$$

Donde:

$$b=\frac{Q_L}{4*\pi*\lambda} \left[\ln \left(\frac{4*\alpha}{r_b^2} \right) -\gamma \right] +Q_L *R_b \quad (9)$$

$$mx=\frac{Q_L}{4*\pi*\lambda} \ln t \quad (10)$$

Quedando:

$$\lambda = \frac{Q/L}{4*\pi*m} \quad (11)$$

El valor del término “λ”, así obtenido, representa la conductividad térmica efectiva de suelo, que comprende por ejemplo, la influencia del agua subterránea, el relleno de la perforación, etc.

El término b representa el intercepto y m, la pendiente.

Donde:

L = Representa el largo de la perforación en (m).

Q = Representa la potencia promedio de calor inyectado.

En este modelo, para reducir los errores de las simplificaciones realizadas, existe un tiempo mínimo de medición, lo cual se denomina criterio de tiempo.

Este criterio de tiempo viene dado por:

$$t \geq \frac{5*r_0^2}{a} \quad (12)$$

En general, existe un límite físico para la mínima duración del test, el cual permite registrar un flujo estable de calor en el suelo. En las primeras horas el desarrollo de la temperatura está principalmente controlado por el relleno de la perforación y no por el suelo que lo rodea.

DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

Construcción:

Se utilizó una excavación para la construcción de una piscina de 4,5 m de largo por 2,3 m de ancho y de 1,5 m de profundidad sobre un piso de 7,5 cm de hormigón ya realizado se colocó un serpentín de caño PEAD $\phi \frac{3}{4}$ " K6 apto para conducciones de agua, el mismo se lo sujeto a una malla sima y se lo relleno de otra capa de hormigón de 7,5 cm de espesor.

Entonces el intercambiador quedó entre un bloque de 14cm de hormigón sin ningún tipo de aditivo, como la bentonita. Luego se construye un tanque de expansión y se lo aísla térmicamente, se coloca una bomba de circulación y luego se instalan los instrumentos de medida.

Realización del ensayo:

En el tanque de expansión se coloca una solución de 100 litros de agua con 2 litros de glicol. La perturbación térmica se realizó con una resistencia eléctrica colocada en el agua del tanque con su respectiva conexión, también se determinó la potencia eléctrica mediante las mediciones de corriente y de tensión. La medición del caudal se realizó mediante un caudalímetro mecánico.

Calculo del número de Reynolds:

El Test de Respuesta Térmica se realizó con un flujo turbulento, ($Re > 3200$).

$$Re = \frac{4 \cdot C}{\pi \cdot \nu \cdot D} \Rightarrow Re = \frac{4 \cdot 0,00042}{\pi \cdot 0,804 \cdot 10^{-6} \cdot 0,018}$$

$$36.658,13 > 3200 \Rightarrow \text{Turbulento}$$

Dónde:

$C = 0,00042$ (m³/seg) Caudal

$T = 30$ °C Temperatura

$\nu = 0,804 \times 10^{-6}$ (m²/seg) Viscosidad Cinemática

$D = 0,018$ m Diámetro

Mediciones del ensayo:

El ensayo se comenzó el día 19/04/2013 “sin perturbación térmica”, para determinar la temperatura de suelo no perturbado.

Esta se obtuvo como el promedio de la temperatura de salida del intercambiador la cual fue de $T_{sur} = 21,65$ °C. Este ensayo sin perturbación térmica culminó el día 20/04/2013, donde la toma de datos se realizó de forma aislada.

El día 20/04/2013, se comenzó el Test de Respuesta Térmica (TRT) con perturbación. La duración del mismo fue de 73 hs, culminando el día 23/04/2013, la toma de datos se realizó de forma manual cada 10 minutos.

Con las mediciones se determinó un valor del coeficiente de conductividad térmica efectiva y la resistencia térmica de suelo en un punto de la Ciudad de San Luis, para este tipo particular de intercambiador.

POTENCIA		Temperatura Suelo no perturbado	Tiempo de ensayo		Temp. Fluido Media al final	Longitud Efectiva del intercambiador
Q (W)	$q = Q/L$ (W/m)	To (°C)	t (Hs)	Ln (t)	Tf (°C)	m
818,9	35,05	21,65	73,766	4,3	35,65	23,36

Tabla 1: Datos de ensayo

DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

En el test de respuesta térmica, se utilizó como fluido portador de calor una mezcla de agua y glicol, con una inyección de 818,9 watts de potencia media y con un caudal circulante de 0,000039 (m³/seg)

Esquema del dispositivo

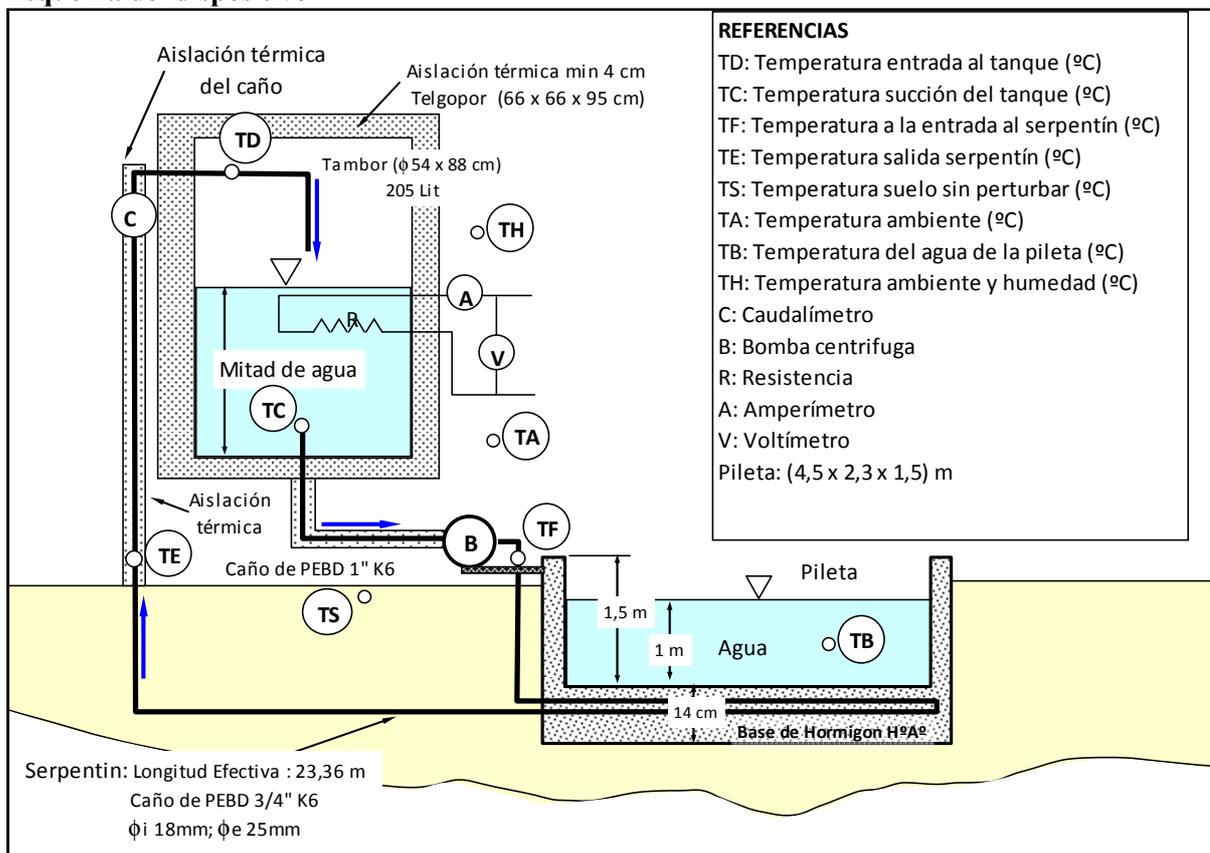


Figura 1. Esquema del dispositivo de medición montado en San Luis - Argentina.

DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE SUELO NO PERTURBADO

La Figura 2, muestra la evolución de la temperatura de salida del fluido portador de calor en el pozo de sondeo. En esta primera etapa de medición se conectó la bomba de circulación, pero no se perturbó eléctricamente por lo que no se inyecta potencia, con el objeto de determinar la temperatura del suelo no perturbado, T_{sur} .

Para esto se promedió la temperatura de salida del fluido portador de calor, donde se desestimó la primera medición por estar en conjunto fuera de régimen.

El tiempo de la medición sin perturbación fue de aproximadamente 22 hs. Obteniéndose el siguiente valor de $T_{sur} = 21,65 \text{ }^\circ\text{C}$.

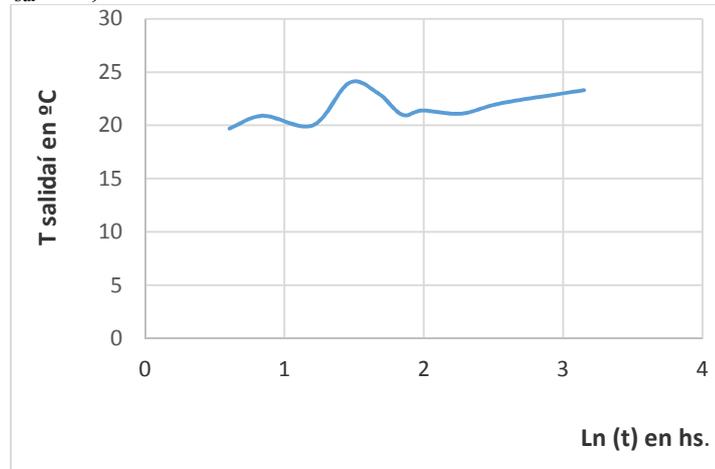


Figura 2. Evolución de la temperatura de salida del pozo de sondeo sin perturbación

DETERMINACIÓN DE (T_f) TEMPERATURA MEDIA DEL FLUIDO EN FUNCIÓN DEL $\ln(t)$

La determinación de (T_f) temperatura media del fluido en función del $\ln(t)$ en horas, la Figura 3 muestra la evolución de la temperatura media del fluido portador de calor T_f , desde el momento en que comenzamos a inyectarle calor hasta la culminación del test, asimismo se observa la linealización de la curva, la pendiente y el coeficiente de determinación R^2 .

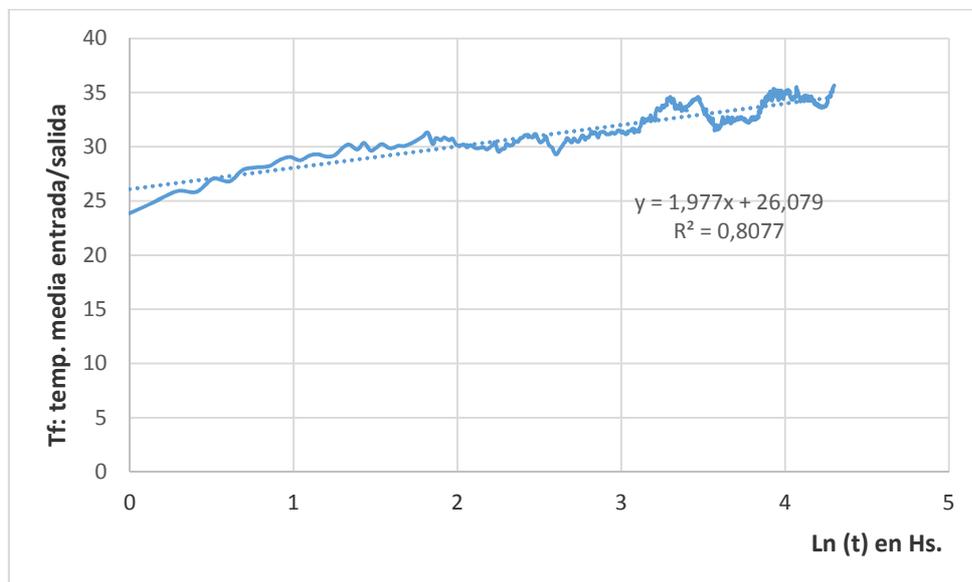


Figura 3. Temperaturas media entrada/salida en función del $\ln(t)$ en horas del pozo de sondeo

APLICANDO EL CRITERIO DEL TIEMPO:

$$t \geq \frac{5 \cdot r_0^2}{a} \quad (12)$$

Dónde:

α : Difusividad térmica del hormigón:

$$\alpha = 0,91 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{seg}$$

$r_0 = 0,075$ m, radio del pozo

Por lo cual el tiempo valido para la evaluación de la pendiente es:

$$t \geq \frac{5 \cdot 0,075^2}{0,91 \cdot 10^{-6}} = 30907 \text{ seg}$$

Que es aproximado a 9 horas, a partir de este valor de tiempo se puede evaluar la evolución de la temperatura media del fluido en función del logaritmo natural del tiempo en horas.

La Figura 4, muestra la evolución del fluido portador de calor desde el criterio de tiempo 't' hasta la culminación del ensayo, la linealización de la curva, la pendiente y el coeficiente de determinación R^2 .

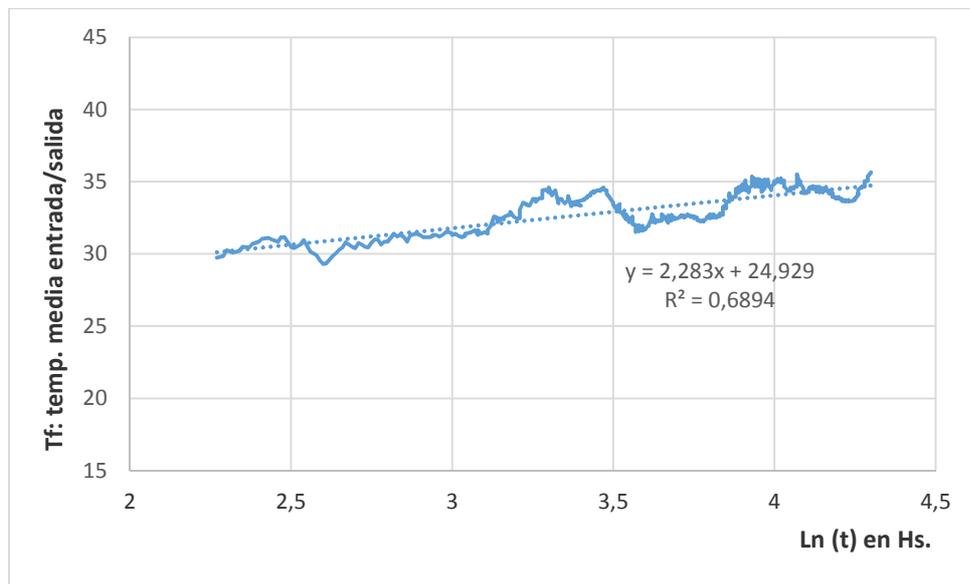


Figura 4 .Evolución de la temperatura media entrada/salida en función del $\ln(t)$ en hs, aplicando criterio de tiempo

Por lo cual se puede determinar el parámetro de λ :

λ : para el ensayo total fue del orden de: $1,42 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$, para $m = 1,97$

λ : aplicando el criterio de tiempo resultado: $1,23 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$, para $m = 2,28$

VARIABLES MEDIDAS EN EL ENSAYO con referencia a la figura 1.

- 1.- Temperatura de entrada al serpentín TF ($^{\circ}\text{C}$)
- 2.- Temperatura de salida del serpentín TE ($^{\circ}\text{C}$)
- 3.- Tiempo de realización del ensayo
- 4.- Temperatura del agua de la pileta TB ($^{\circ}\text{C}$)
- 5.- Temperatura de suelo sin perturbar TS ($^{\circ}\text{C}$)
- 6.- Temperatura ambiente TA ($^{\circ}\text{C}$)
- 7.- Porcentaje de humedad TH (%)

REGRESIÓN LINEAL SIMPLE

En el ensayo, se considero en primer lugar hacer un análisis de regresión lineal simple tomando

como variable dependiente la temperatura media de entrada y salida del serpentín y como variable independiente al logaritmo natural del tiempo del ensayo medido en horas, resultando en dicho análisis que tanto la pendiente como la ordenada al origen fueron respectivamente altamente significativas al 5% de significación (p. value = 0), con un R-cuadrado ajustado del 68,859 %.(Figura 4). (John E. Freud, Ronald E. Walpole, 1990; Miler y Freud, 1997)
 EL modelo ajustado fue:

$$\text{Temperatura} = 2.283 * \text{Ln}(t) + 24.929 \quad (13)$$

REGRESION LINEAL MULTIPLE

Luego se consideró realizar, un análisis de regresión lineal múltiple, teniendo en cuenta las variables medidas en el ensayo con referencia a la Figura 1.

Se tomó como variable dependiente la temperatura media de entrada y salida del serpentín y como variables independientes a: Logaritmo natural del tiempo, temperatura del agua, temperatura del suelo, temperatura ambiente y porcentaje de humedad, resultando altamente significativas al 5% de significación el Logaritmo natural del tiempo de ensayo medido en horas (LN HORAS, Valor-P = 0), temperatura del suelo (TEMP. SUELO, Valor-P = 0), temperatura ambiente (TEMP. AMBIENTE, Valor-P = 0) y porcentaje de humedad (PORCENT. HUMEDAD, Valor-P= 0.0057), no así temperatura del agua (TEMP. AGUA, Valor-P = 0.8630) (Tabla 2), siendo el modelo ajustado altamente significativo al 5% de significación (Modelo, Valor-P=0) (Tabla 3), con un R-cuadrado ajustado (coeficiente de determinación) igual a 90,1953 % (Tabla 4)

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
CONSTANTE	19,9477	0,424888	46,9481	0,0000
LN HORA	2,33679	0,0775953	30,115	0,0000
TEMP. SUELO	0,287008	0,0214188	13,3998	0,0000
TEMP. AGUA	0,000792396	0,00458851	0,172691	0,8630
TEMP. AMBIENTE	-0,0233088	0,00385061	-6,05328	0,0000
PORCENT. HUMEDAD	0,0305104	0,0109675	2,7819	0,0057

Tabla 2: Regresión múltiple

Donde:

Parámetro: variables independientes del modelo

Estimación: Valor estimado de las variables independientes por el método de mínimos cuadrados ordinarios

Error Estándar: Error Estándar de los estimadores (variables independientes)

Estadístico T: Valor del Estadístico T de los parámetros estimados

Valor-P: Utilizado para determinar si los resultados de los parámetros estimados, son estadísticamente significativos.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	740,246	5	148,049	701,98	0,0000
Residuo	79,2998	376	0,210904		
Total (Corr.)	819,546	381			

Tabla 3: Análisis de varianza

Donde:

Suma de Cuadrados: Fuentes de Variación

GL: Grados de Libertad

Cuadrado Medio: Estimaciones de la varianza

Razón-F: Valor del Estadístico F (razón entre el cuadrado medio del modelo y el residuo)

$F = \text{Cuadrado Medio del Modelo} / \text{Cuadrado Medio del Residuo}$ permite estimar si la relación entre las variables explicatorias y la respuesta es significativa.

Valor-P: Utilizado para determinar si el modelo es estadísticamente significativo

R-cuadrada	90,3239 por ciento
R-cuadrado (ajustado para g.l.)	90,1953 por ciento

Tabla 4: valores de R-cuadrado y R-cuadrado ajustado

Donde:

R-cuadrado y R-cuadrado (ajustado para gl): también llamados coeficientes de determinación, indican que porcentaje de varianza de la variable dependiente, es explicado por el modelo de regresión, como la variable temperatura del agua no fue significativa para el modelo planteado, se decidió sacar del modelo a dicha variable y hacer nuevamente el análisis de regresión múltiple sin la variable temperatura del agua resultando altamente significativas al 5% de significación: Logaritmo natural del tiempo de ensayo medido en horas (LN HORA, Valor-P = 0), temperatura del suelo (TEMP. SUELO, Valor-P = 0), temperatura ambiente (TEMP. AMBIENTE, Valor-P = 0) y porcentaje de humedad (PORCENT. HUMEDAD, Valor - P= 0.0057) (Tabla 5), siendo el modelo ajustado altamente significativo al 5% de significación (Modelo, Valor-P=0) (Tabla 6), con un R-cuadrado ajustado (coeficiente de determinación) igual a 90,2205 por ciento (Tabla 7).

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
CONSTANTE	19,9533	0,423109	47,1588	0,0000
LN HORA	2,33694	0,0774904	30,1577	0,0000
TEMP. SUELO	0,287532	0,0211757	13,5784	0,0000
TEMP. AMBIENTE	- 0,0233127	0,00384558	-6,06221	0,0000
PORCENT. HUMEDAD	0,0304161	0,0109398	2,78033	0,0057

Tabla 5: Regresión múltiple

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	740,24	4	185,06	879,73	0,0000
Residuo	79,306	377	0,210361		
Total (Corr.)	819,546	381			

Tabla 6: Análisis de varianza

R-cuadrado	90,3232 por ciento
R-cuadrado (ajustado para g.l.)	90,2205 por ciento

Tabla 7: valores de R-cuadrado y R- cuadrado ajustado

Por lo expresado anteriormente, se elige como modelo a:

$$\begin{aligned} \text{Temperatura} = & 19,8425 + 2.30672 * \text{Ln}(t) + 0,283991 * \text{Temp. suelo} \\ & - 0,0210352 * \text{Temp. ambiente} + 0,0367758 * \text{Porcent. humedad} \end{aligned} \quad (14)$$

Este modelo ajustado no es posible graficarlo con los datos medidos pues se trata de un modelo lineal múltiple con una variable dependiente (Temperatura) y 4 variables independientes (Ln (t), Temperatura del suelo, Temperatura ambiente y Porcentaje de Humedad) y para visualizarlo, necesitamos un espacio de 5 dimensiones.

CONCLUSIONES

A partir de la determinación de la conductividad efectiva λ_{eff} (W/m*°K) y de la resistencia térmica del suelo R_b (K / (W/m), para un intercambiador horizontal particular ubicado en un lugar de la Ciudad de San Luis en la República Argentina.

La directriz VDI 4640 “Thermal use of the underground”, para instalaciones con una potencia térmica de hasta 30 kW, señala reglas de dimensionamiento, con valores de λ_{eff} y R_b . dados por esta directriz mientras que para potencias térmicas mayores exige la realización del TRT, de esta forma se logra el correcto dimensionado del captador al poder obtener in situ los valores reales de λ_{eff} y R_b . los cuales son elementos clave para este tipo de instalaciones geotérmicas.

Una vez obtenida la conductividad térmica se encuentra la resistencia térmica del intercambiador y la resistencia del material que lo rodea. Estos parámetros indica la calidad de un sistema geotérmico.

La conductividad térmica efectiva λ_{eff} , está dada por la pendiente de la curva determinada por la nube de puntos de las mediciones de temperatura media de entrada y salida respecto al logaritmo natural del tiempo, el valor de la pendiente se determina por el criterio de tiempo empleado y a su vez este valor está relacionado con la difusividad térmica del sistema (hormigón), que se adopta por medio de tablas.

Entonces en el caso de San Luis, λ_{eff} , que sería el reflejo del intercambiador montado ya que de un lado tenemos suelo sin rocas, y sobre el otro lado agua.

Comparando datos de TRT, se puede afirmar que el método grafico de la pendiente, utilizado para la obtención de los valores de λ_{eff} y R_b , da valores con suficiente aproximación con respecto a ensayos realizados en otras partes del mundo.

También se comparó los valores de los dos test realizados en San Luis, pudiendo concluir que los datos obtenidos en ambos, con un año de diferencia, son muy parecidos, lo cual indicaría valores bastante correcto; También se relevaron datos de la temperatura el agua de la pileta, temperatura de suelo no perturbado, temperatura ambiente y porcentaje de humedad, con los datos obtenidos se realizaron dos modelos estadísticos, que se presentan en este trabajo.

De todo lo que se analizó y se observó de los dos modelos ajustados, se puede concluir que el modelo lineal múltiple tiene un R - cuadrado ajustado mucho mayor ($R^2 = 90,2205 \%$) que el modelo lineal simple ($R^2=68.94\%$), por lo cual el mejor modelo de ajuste para la temperatura es el modelo lineal múltiple.

Lo cual significa que conjuntamente la variables independientes: Logaritmo natural del tiempo medido en horas, temperatura del suelo, temperatura ambiente y porcentaje de humedad aportan aproximadamente un 22% más de ajuste que el modelo lineal simple en el que se consideró solamente como variable independiente al logaritmo natural del tiempo medido en horas.

REFERENCIAS

- [1] Austin III, W. A., (1998), Development of an Situ System for Measuring Ground Thermal Properties. Tesis de Maestria, Oklahoma State University.
- [2] Busso A., Reuss M., Müller J., Sograri N. (2000), Almacenamiento Subterráneo de Energía Térmica: Resultado de un ensayo de respuestas térmicas del subsuelo. Avance en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 4, N° 1.
- [3] Busso A., Reuss M., (2000), Ensayo de Respuestas Térmicas: Método de Evaluación de la Pendiente vs Ajuste Con Dos Parámetros Variables. Dpto. de Física – Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UNNE – Corrientes Argentina.
- [4] Eklöf C, Gehlin S. (1996). A Mobile Equipment for Thermal Response Test. Master of science thesis 1996:198E. Luleå University of Technology. Sweden.
- [5] Gehlin, S. and Nordell, B. 1997. "Thermal Response Test - a Mobile Equipment for Determining Thermal Resistance of Borehole." Proc. Megastock '97 Sapporo, pp. 103-108
- [6] Hellström, G. 1997. "Thermal response test of a heat store in clay at Linköping, Sweden." Proc. Megastock '97 Sapporo, pp. 115-120
- [7] Ingersoll, L.R. and Plass, H.J. 1948. "Theory of the ground pipe heat source for the heat pump." Heating, Piping & Air Conditioning 20/7, pp. 119-122
- [8] John E. Freud, Ronald E. Walpole. Estadística Matemática con aplicaciones. Printice Hall Hispanoamericana. 1990. pp 494-498.
- [9] Miler y Freud, Probabilidad y Estadística para Ingenieros, Prentice Hall. 1997. pp 356-360.

ABSTRACT

This work was done in order to apply a statistical analysis of simple and multiple linear regression test for in situ thermal responses; In this test values the effective thermal conductivity of λ_{eff} subsoil, and thermal resistance R_b , corresponding to a particular horizontal system heat exchanger were determined.

These field tests are based on the model of the source of infinite line (ILS), heat transfer by thermal conduction of kelvin; The values were obtained by the graph slope method and subsequently enhanced statistical study.

Keywords: Simple and multiple linear regression, test thermal response, horizontal exchanger, slope method.