

EVALUACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS EN UN PERFIL SOMERO DE SUELO LOÉSSICO

Magalí E. Carro Pérez¹, Micaela Pleitavino², Belén Mansilla², Rocío B. Toledo², Santiago Aratano Jalin², Rodrigo Bruni²

¹ Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEfYN) - Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT) Universidad Nacional de Córdoba (UNC) - Vélez Sarsfield 1611, CP 5017, Córdoba, Argentina – Tel. + 54 0351 – 5353800, interno. 18. E-mail: mcarroperez@unc.edu.ar

² Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEfYN) - Vélez Sarsfield 1611, CP 5017, Córdoba, Argentina

RESUMEN: En este trabajo se determina la distribución de temperaturas en profundidad somera en los suelos limosos del centro de Argentina a lo largo de ciertos períodos del año (invierno y verano), en las profundidades que se construyen habitualmente las cimentaciones superficiales (plateas y zapatas) de viviendas y donde se instalan sistemas geotérmicos de aire o agua de tipo horizontales. Se obtienen valores útiles para evaluar la potencial aplicación y eficiencia de sistemas someros para el aprovechamiento geotérmico de baja entalpía en viviendas en el centro de Argentina. El estudio del perfil de temperatura y humedad del subsuelo permite diseñar y modelar sistemas capaces de aprovechar la energía calorífica y disminuir el impacto ambiental producido por fuentes convencionales.

Palabras clave: Loess, Baja Entalpía, Geotermia, Eficiencia Energética.

INTRODUCCIÓN

Históricamente, las principales fuentes de energía utilizadas por la humanidad han derivado de recursos no renovables, tales como combustibles fósiles. En las últimas décadas, en consonancia con la crisis energética mundial que genera impactos ambientales de manera progresiva, se ha despertado un interés creciente en el estudio y aplicación de energías renovables. Bajo este panorama, todos los esfuerzos se dirigen hoy a la búsqueda y fomento de consumo de energías alternativas y limpias (Glassley, 2013). La energía geotérmica aparece como una fuente particularmente atractiva, ya que su utilización se asocia a bajas tasas de emisión de gases contaminantes, y no presenta problemas de disponibilidad (De la Bernardie et al., 2017): es una energía ubicua. No requiere de combustión ni mecanismos de implementación que puedan llegar a incurrir en peligros, y, además, es autosuficiente, siendo independiente de otras fuentes energéticas al momento de su utilización (Sigal et al., 2015). El Consejo Europeo de la Energía Geotérmica (EGEC) define a la energía geotérmica como la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie del terreno. Se considera el calor almacenado en rocas, suelos y aguas subterráneas, cualquiera sea su temperatura, profundidad o procedencia. En función de la temperatura o más exactamente, de la entalpía presente en el subsuelo, se pueden clasificar en energía geotérmica de muy baja, baja, media y alta entalpía (Xydis et al., 2013). La energía geotérmica superficial o de muy baja entalpía es la que se puede aprovechar para la climatización de construcciones mediante el empleo de bombas de calor geotérmicas (Fu et al., 2013). La tierra tiene una gran inercia térmica y capacidad de almacenar calor y mantenerlo estacionalmente.

Al mismo tiempo, las cimentaciones de construcciones civiles, como por ejemplo plateas o pilotes, pueden ser utilizados como sistemas de almacenamiento de calor (Suckling y Cannon, 2004). El intercambio geotérmico se realiza mediante un circuito instalado en conducciones que se instalan de manera vertical u horizontal en el terreno junto al edificio o vivienda. El flujo de calor se favorece mediante la circulación de fluidos utilizando una bomba de calor y el sistema de conducción que funciona como un intercambiador de calor (Sanner, 2001; Brandl, 2006, Johnston et al. 2011). En todo momento se busca mantener una temperatura confortable en el interior de las construcciones, aunque, en el verano, el aire exterior se encuentra a elevadas temperaturas y en invierno en el exterior las temperaturas del aire sean inferiores a la de confort. Mediante los sistemas de aprovechamiento de energía geotérmica superficial se produce un intercambio de calor entre el fluido que circula y la tierra de manera directa o a través de las cimentaciones. En invierno la tierra transfiere al fluido el calor que almacena el cual se utiliza para calefacción mediante la circulación del fluido mediante una bomba de calor. En verano, el agua transfiere al terreno el exceso de calor del edificio de forma de obtener refrigeración (Brandl, 1998).

La utilización de la energía geotérmica somera como una opción económica y ecológicamente amigable para la colaboración en la climatización de ambientes ha sido analizada e incluso se han realizado cálculos y diseño en base a las características térmicas de los parámetros intervinientes, tanto del suelo y clima local como de los materiales de la envolvente de la construcción en condiciones suelo loésico (Carro Pérez et al., 2018).

En este trabajo se mide la variación de la temperatura en profundidad somera en los suelos limosos del centro de Argentina a lo largo de ciertos períodos del año (invierno y verano), en las profundidades que típicamente se construyen las cimentaciones superficiales (plateas y zapatas) de viviendas. Esta medición es útil para evaluar la potencial aplicación y eficiencia de sistemas someros para el aprovechamiento geotérmico en viviendas en el centro de Argentina para sistemas horizontales de aire (denominados pozos canadienses o provenzales) o para sistemas de sondas geotérmicas horizontales con fluidos y bomba geotérmica. Para estimar el potencial energético de algún suelo o roca se deben determinar sus características y así ser explotado de manera económicamente factible. A través del estudio del perfil de temperatura y humedad del subsuelo somero se podrían diseñar y desarrollar sistemas de geotermia de baja entalpía capaces de sustituir o complementar sistemas tradicionales y disminuir el impacto ambiental producido por las fuentes de energía convencionales.

Variación de la temperatura en función de la profundidad: La temperatura del suelo se ve afectada por variables meteorológicas. Los elementos meteorológicos como la radiación solar y la temperatura del aire influyen en la temperatura de la superficie y del subsuelo al afectar la velocidad a la que se intercambia el calor entre la atmósfera y el suelo. La radiación solar es probablemente el factor más importante, los cambios estacionales y diarios de la misma imponen una variación cíclica tanto en la temperatura del aire como en la temperatura de la superficie del suelo. Otros factores meteorológicos como el viento y la lluvia pueden causar variaciones locales significativas. La vegetación puede proporcionar un efecto aislante, protegiendo el suelo subyacente de los extremos climáticos que causan altas tasas de transferencia de calor hacia y desde la atmósfera. Otras características del terreno, como la orientación de la pendiente, pueden tener efectos considerables.

La temperatura de la superficie del suelo permanece prácticamente en fase con la del aire. Debajo de la superficie, sin embargo, el máximo o mínimo ocurre más tarde que los valores correspondientes en la superficie, aumentando el desfase temporal con la profundidad. Es posible identificar una ciclicidad a mayor escala o anual, y una ciclicidad diaria, asociadas a las variaciones estacionales y a los ciclos día/noche respectivamente. Estas variaciones se limitan a la región cercana a la superficie: los ciclos diarios, penetran aproximadamente 0,5 m, mientras que la temperatura de la tierra más allá de una profundidad de 1,0 m suele ser insensible al ciclo diario de la temperatura del aire y la radiación solar,

y la fluctuación anual (variaciones estacionales) de la temperatura de la tierra se extiende a una profundidad de unos 10,0 m dependiendo de la zona. A partir de allí el subsuelo tiene la capacidad de almacenar el calor que recibe y mantenerlo estacionalmente (temperatura del terreno prácticamente constante durante todo el año).

Entre los antecedentes existentes, se puede mencionar que en la provincia de Buenos Aires se realizó un estudio teórico-experimental de la propagación de ondas térmicas en el suelo (lanelli y Gil, 2012) con el objeto de evaluar la posibilidad de aprovechar la energía geotérmica del suelo, a poca profundidad. Los autores, para la parte experimental utilizaron una sonda de 35 cm y a partir de los resultados obtenidos se realizaron aproximaciones teóricas. Por otra parte, un estudio realizado en Huelva, España (Andújar et al, 2016), desarrolló una sonda para medir el perfil de temperatura a una profundidad de 4,8 metros.

METODOLOGÍA

Sitio de estudio: El sitio de estudio corresponde a las pedanías de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEFyN) de la Universidad Nacional de Córdoba, ubicada en la Ciudad de Córdoba (Argentina). Los perfiles de suelo de la zona corresponden a perfiles de suelos loésicos típicos de la región. La perforación efectuada se encuentra en las coordenadas de latitud 31° 26' 4,75" S y longitud 64° 11' 39,88" O, a una altura aproximada de 424 m.s.n.m.

Caracterización del loess: Se recogieron tres muestras de suelo en el sector de estudio a profundidades de 0,30 m, 0,60 m y 0,90 m, las que se caracterizaron a partir de ensayos de identificación en el Laboratorio de Geotecnia de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, según las siguientes normas: Determinación de humedad natural según ASTM D 2216, Límites de consistencia según ASTM D 4318, Granulometría método tamizado según ASTM D 422, Granulometría método hidrómetro según ASTM D 7928, Clasificación Unificada de Suelos según ASTM D 2487. En la Tabla 1 se detallan los valores obtenidos en los ensayos de identificación.

Profundidad (m)	Humedad natural (%)	Granulometría (%)			Límites de consistencia (%)	
		Arena	Limo	Arcilla	LL	IP
0,3	13,6	7	83	11	27,1	4,4
0,6	12,1	26	64	10	21,7	2,8
0,9	12,5	21	68	11	21,1	2,3

Tabla 1: Caracterización de las muestras de loess. LL: Límite Líquido, IP: Índice de Plasticidad

Sensores: Para la recolección de datos de temperatura del subsuelo se optó por sensores de temperatura ds18b20 dispuestos según el siguiente esquema: uno muy próximo a la superficie (0,05 m), y el resto con un espaciamiento de 0,3 m hasta la profundidad máxima del pozo (cotas 0,3 m; 0,6 m; 0,9 m; 1,2 m y 1,5 m), con una tasa de medición igual a 15 minutos.

Para la medición de la radiación solar se optó por un piranómetro de silicio (Silicon Pyranometer Smart Sensor (S-LIB-M003)), marca HOBO. El piranómetro utilizado ofrece un rango de medición de 0 a 1280 W/m² en un rango espectral de 300 a 1100 nm, mientras que un piranómetro ideal tiene una respuesta espectral igual de 280 a 2800 nm (espectro de radiación solar). Este sensor utiliza un fotodiodo de silicio para medir la energía solar por unidad de área (W/m²). Si bien los fotodiodos de silicio no son

ideales para usar como sensores de radiación solar, cuando se calibran y se usan bajo luz solar natural (descartando mediciones en días nublados o de luz reflejada), deberían ser funcionales en la mayoría de las situaciones y los errores asociados serían mínimos. En este sentido, se evitó la instalación del sensor bajo luz artificial, dentro de las cubiertas de las plantas, en invernaderos o en cualquier otra condición donde el contenido espectral difiera de la luz solar. Por otro lado, dicho piranómetro admite el promedio de medición, es decir, las muestras múltiples se promedian juntas y el valor promedio se almacena como dato para el intervalo. Esta función es recomendable siempre que el sensor se coloque en un área donde el nivel de luz puede variar rápidamente con respecto al intervalo de registro (por ejemplo, en condiciones parcialmente nubladas). En conclusión, el piranómetro es adecuado para medir la luz solar natural; pero en condiciones de cielo nublado o para medir la luz reflejada, se recomienda el uso de un piranómetro de termopila.

El dispositivo seleccionado tiene una exactitud de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ para temperaturas de -55°C a 85°C , pudiendo ser más acotada en el rango de interés. Trabajos sobre calibración de estos sensores han demostrado su aptitud para aplicaciones similares (Lewis et al., 2016). Otros trabajos afirman que mediante calibración de los dispositivos puede reducirse en un 50% el error de la medición (Koestoer et al., 2019). Debido a que el error especificado por el fabricante para el dispositivo sin calibrar es suficiente para la realización de las mediciones, se opta por trabajar por no realizar la calibración de los sensores de medición.

Perforación y medición: La perforación se realizó con una profundidad de 1,5 m y un diámetro de 0,20 m, en una zona del terreno con baja a nula pendiente, y con incidencia de radiación solar máxima. Para dicha tarea se utilizó una hoyadora con mechas helicoidales (Figura 1). Para decidir la ubicación se buscaron puntos en los alrededores de la FCEfyN sede Ciudad Universitaria en los que durante las horas diurnas no existiera sombra; de esta manera la influencia de la radiación solar en el suelo sería máxima. Se decidió realizar el pozo a aproximadamente 1,5 m de la reja que resguarda un avión de exposición del predio por ser un lugar seguro. En la perforación se colocaron los sensores de temperatura ds18b20 según el diseño presentado en la Figura 2, a las profundidades 0,05 m, 0,3 m, 0,6 m, 0,9 m, 1,2 m y 1,5 m. La perforación se rellenó con el mismo suelo extraído, respetando el ordenamiento del perfil y rellenando y compactando cada pequeños tramos. Se instalaron además dos sensores de temperatura ambiente y uno de humedad ambiente sobre la superficie. La estación de registro de datos se instaló por dentro de la reja que resguarda al avión para evitar robos o algún acto de vandalismo. Los datos se tomaron, en un comienzo, cada 30 minutos y luego cada 15 min, para de esta manera poder comparar los datos con los obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). El piranómetro se ubicó en el techo del edificio de la FCEfyN evitando la cercanía de cualquier elemento que pudiera influir en la medición de la radiación en algún momento del día y asegurando su horizontalidad ya que una pequeña inclinación generaría errores en la medición. El tiempo de toma de datos se estableció también cada 15 minutos, para compararlos con los tomados con la misma tasa por el Centro de Investigaciones Acústicas y Luminotécnicas (CIAL) ubicado a un kilómetro de distancia.

Para corroborar la consistencia de las mediciones obtenidas, se realizó una comparación entre los valores medidos con los sensores propios y los valores obtenidos de las estaciones meteorológicas del CIAL y del SMN.



Figura 1: Ejecución de la perforación y colocación de sensores. (a) Utilización de hoyadora (b) Profundidad de la perforación (c) Colocación de sensores.

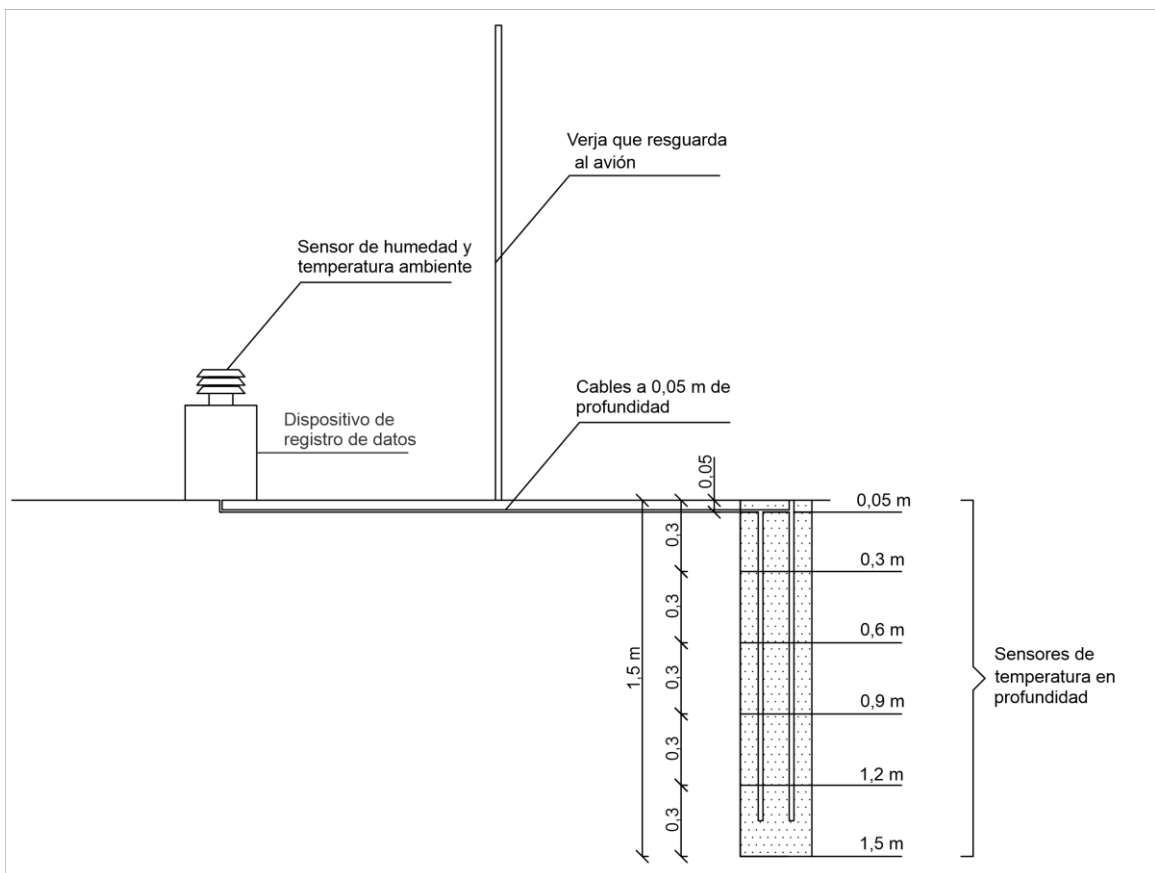


Figura 2: Disposición de sensores de humedad y temperatura.

RESULTADOS

Se registraron datos de temperatura en el suelo loésico durante el periodo que comprende los últimos días del mes de noviembre de 2019 hasta fines de marzo de 2020, y desde mediados de junio hasta fines de agosto obteniendo marcados cambios entre época estival e invernal. Los datos de humedad se obtuvieron para los mismos periodos de tiempo y se compararon con los tomados por el CIAL y los brindados por SMN para corroborar su validez. En relación a los datos medidos con el piranómetro (radiación solar) sólo se cuenta con datos de verano, los que fueron útiles para obtener conclusiones en relación al funcionamiento y desempeño de dicho instrumento al compararlos con los datos del CIAL.

En la Figura 3 se presenta la comparación de los resultados de radiación solar del período noviembre de 2019. Se evidencia que algunos días (por ejemplo el 21/11) las curvas de radiación medida en la FCEfyN y en el CIAL difieren en un amplio rango, mientras que durante otros días (como por ejemplo el 27/11) las curvas son más suaves y las diferencias son menores, presentándose nulas para la radiación de fondo y con una tendencia al aumento hacia las horas pico. En cuanto a la primera observación, esto se debe a que en días nublados los datos de radiación se ven fuertemente afectados por la presencia de las nubes en el momento de la toma de la medición, generando picos en la gráfica que estarán en función del lugar de medición; en relación a la segunda observación, si bien existe una tendencia comparable en ambas gráficas, el sensor HOBO utilizado, en la mayoría de los casos, toma medidas por encima de las tomadas por el CIAL. Esta tendencia se observa claramente en los días totalmente despejados como es el caso del 27, 28 y 29 de noviembre en donde la diferencia entre datos tomados y los del CIAL son predominantemente positivas. Hay que destacar que en los días despejados se observa que esta diferencia es la misma, indicando una sobreestimación del sensor HOBO o una subestimación del sensor del CIAL, con una diferencia máxima aproximada de 150 W/m^2 . Como se refirió anteriormente, en la medida que la radiación aumenta durante el transcurso del día, tienden a producirse las mayores diferencias.

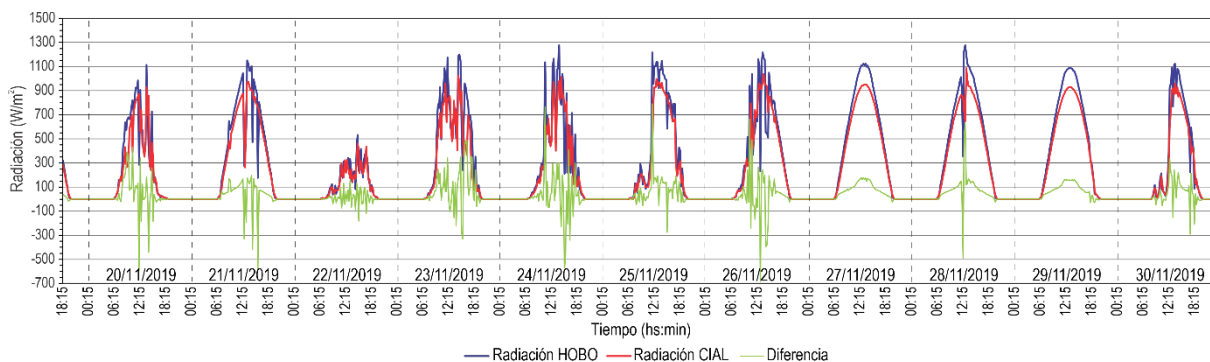


Figura 3: Registro de radiación solar durante los últimos días del mes de noviembre de 2019.

Se tomaron datos de temperatura ambiente con dos dispositivos, uno de ellos dispuesto junto al sensor de humedad ambiente (sensor T_A), a unos 0,30 m sobre la superficie del terreno, y el otro en la superficie del terreno (sensor T_B). Se comparó el registro de temperatura ambiente con los datos brindados por el CIAL (Figura 4) y los obtenidos mediante el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), sede Córdoba Aeropuerto y Córdoba Observatorio (Figura 5), a partir de lo cual se desprendieron las siguientes observaciones:

- Las temperaturas medidas por los sensores instalados en la FCEfyN son similares, con una diferencia promedio de $0,23 \text{ }^\circ\text{C}$ y una diferencia máxima de $4,28 \text{ }^\circ\text{C}$ para el periodo considerado.
- Los promedios de diferencias de temperatura obtenidos en comparación con el registro del CIAL son $0,74 \text{ }^\circ\text{C}$ para el sensor T_A y $0,51 \text{ }^\circ\text{C}$ para el sensor T_B , con una diferencia máxima de $4,9 \text{ }^\circ\text{C}$ (sensor T_A) y $3,3 \text{ }^\circ\text{C}$ (sensor T_B). Las diferencias se amplifican durante las horas diurnas.
- Con respecto a las temperaturas obtenidas del SMN, se observa una menor diferencia en relación a las mediciones del Observatorio, que con los del Aeropuerto, probablemente por su mayor cercanía al centro de la ciudad y a la sede de la FCEfyN de Ciudad Universitaria. Las diferencias promedio entre el sensor T_A y los sensores de Observatorio y el Aeropuerto son $0,18 \text{ }^\circ\text{C}$ y $1,85 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente; y entre el sensor T_B y los sensores de Observatorio y el Aeropuerto son $0,001 \text{ }^\circ\text{C}$ y $1,67 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente. Las diferencias máximas entre el sensor T_A y los sensores de Observatorio y el Aeropuerto son $3,2 \text{ }^\circ\text{C}$ y $4,8 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente; y entre el sensor T_B y los sensores de Observatorio y el Aeropuerto son $3,16 \text{ }^\circ\text{C}$ y $4,63 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente.

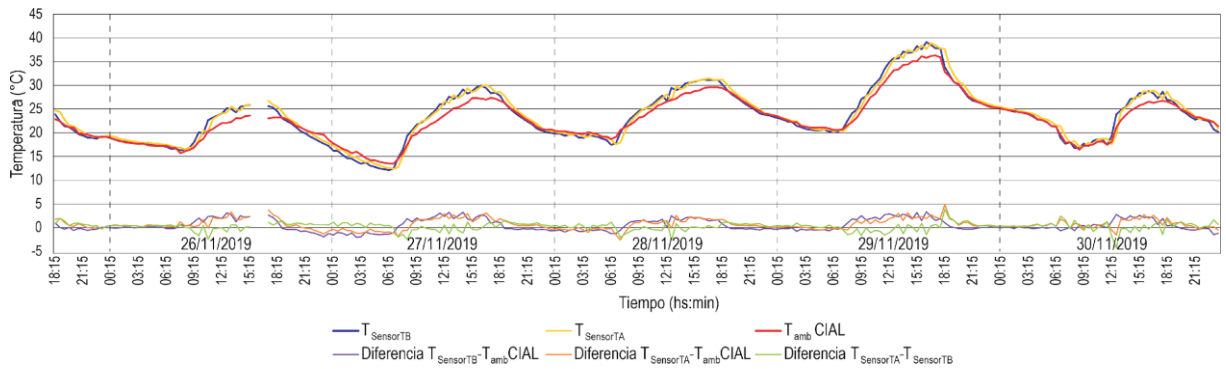


Figura 4: Comparación de datos propios de temperatura ambiente con datos brindados por CIAL.

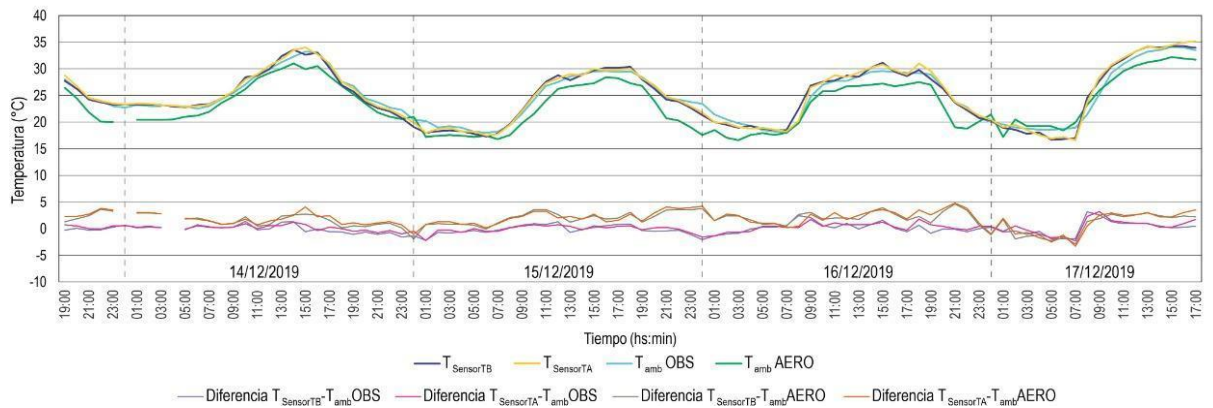


Figura 5: Comparación de datos propios de temperatura ambiente con datos brindados por el SMN.

En las Figuras 6 y 7 se presentan los registros de humedad, en los que es posible observar que:

- Los datos registrados tienen idéntica tendencia que los del CIAL, con una diferencia en la mayoría de los casos positiva, es decir que se obtuvieron valores de humedad ambiente mayores. El promedio de los errores es de 6,79% de humedad, con una diferencia máxima de 30,2%.
- Con respecto a los obtenidos del SMN, para Observatorio, el promedio de las diferencias ronda el 8,2% de humedad y la diferencia máxima observada es de 26,2%. En cuanto a la estación del Aeropuerto, la diferencia promedio es de 1,87% y la diferencia máxima de 32,2%.

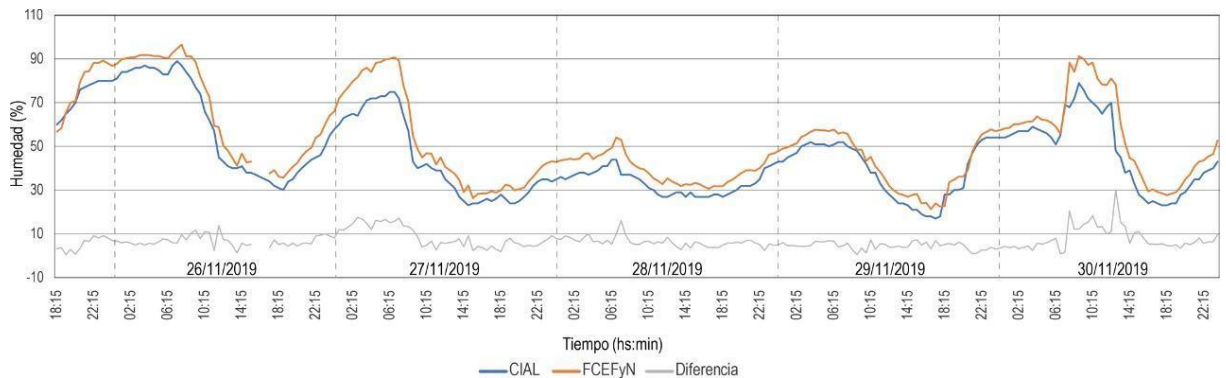


Figura 6: Comparación de datos propios de humedad con datos brindados por el CIAL.

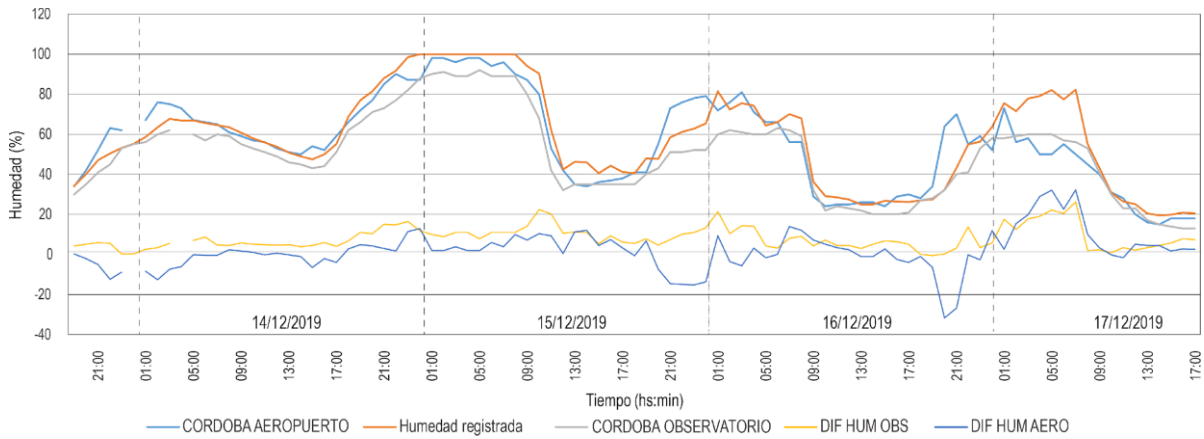


Figura 7: Comparación de datos propios de humedad con datos brindados por el SMN.

En las Figuras 8 a 13 se presentan las temperaturas registradas en la perforación a distintas profundidades y en épocas de verano e invierno.

Para el verano, en la Figura 8, se puede observar que:

- Las temperaturas más altas son alcanzadas a la menor profundidad, es decir a los 0,05 m. Desde este punto y, a medida que aumenta la profundidad, la temperatura comienza a disminuir y la variación diurna es menor; desde los 0,6 m de profundidad el suelo no registra influencia cíclica diurna y sólo se observa una gradual tendencia al aumento con un patrón lineal.
- La curva de 0,30 m de profundidad está desfasada $\frac{1}{2}$ periodo en relación a la de 0,05 m: en el momento en que la temperatura es máxima a los 0,05 m, es mínima a los 0,30 m. Es decir que existe un retardo de aproximadamente 12 horas entre el máximo (o mínimo) en cada punto a estas profundidades.
- A partir de los 0,60 m ya no se observa variación alguna a lo largo del día. Se aprecia que a medida que aumenta la profundidad, la temperatura es menor, con una disminución marcada para el registro de 1,5 m, de aproximadamente $2,0^{\circ}\text{C}$, entre los sensores de 1,2 y 1,5 m. La freática en la zona ronda los 20 m, oscilando próxima a ese valor; esto implica que esta diferencia no tiene influencia de la napa, sino que se debe a que, en el periodo analizado, las condiciones climáticas estacionales vinculadas a temperaturas de verano no han tenido impacto a esa profundidad y las temperaturas se encuentran a valores inferiores que el perfil suprayacente, con una leve tendencia a la suba apreciable en la pendiente del registro.
- A los 0,05 m de profundidad, la temperatura es mayor que la ambiente, esto es debido a la incidencia solar y absorción de la radiación sobre la superficie del suelo, en este caso loess.
- En profundidad de 1,5 m la temperatura del suelo se aproxima a la temperatura ambiente media anual, que en el caso de Córdoba oscila en los $18,15^{\circ}\text{C}$ (1981-2010/ Fuente: SMN).

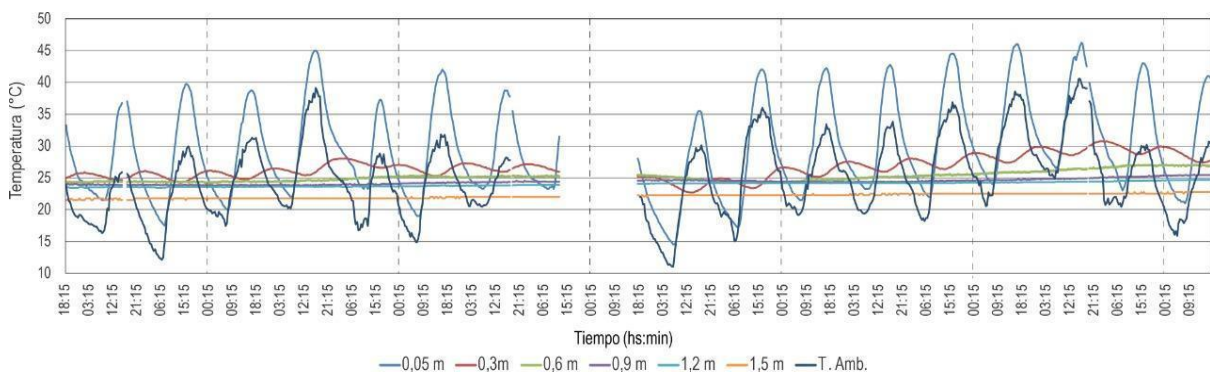


Figura 8: Temperaturas para diferentes profundidades en verano.

En la Figura 9 se representa la variación de la temperatura durante dos días para cada profundidad. Hasta los 0,30 m de profundidad se observan cambios de temperatura diarios. En relación al comportamiento del loess ante la radiación y su capacidad de almacenamiento, se analizan las curvas de temperatura ambiente y la de 0,05 m de profundidad. La temperatura ambiente entre las 7 am y 12 am crece de manera pronunciada, alcanza el pico y disminuye hasta su valor mínimo hacia la noche. Por su parte, en la curva de 0,05 m se observa el almacenamiento de calor en la parte superficial del terreno, lo que se manifiesta en la separación de las curvas de temperatura referidas. Durante las horas nocturnas continúa manteniendo temperaturas más altas y cede calor desde la superficie hacia el aire.

En el Figura 10 se ha graficado la variación de la temperatura promedio para cada mes en función de la profundidad. Se observa que a medida que entramos en época estival la temperatura promedio de todo el perfil aumenta. Se puede observar cómo en febrero (en donde la temperatura ambiente promedio bajó con respecto a enero) el perfil se corrió hacia la izquierda (bajó la temperatura); no obstante, a la profundidad de 1,2 y 1,5 m ocurrió lo contrario, la temperatura subió aún más, mostrándonos que a esa profundidad probablemente recién estaría llegando el calor de los meses con más temperatura. Este enfriamiento de las primeras capas del suelo se podría correlacionar con el aumento de las lluvias en el mes de febrero y su infiltración en las capas más superficiales.

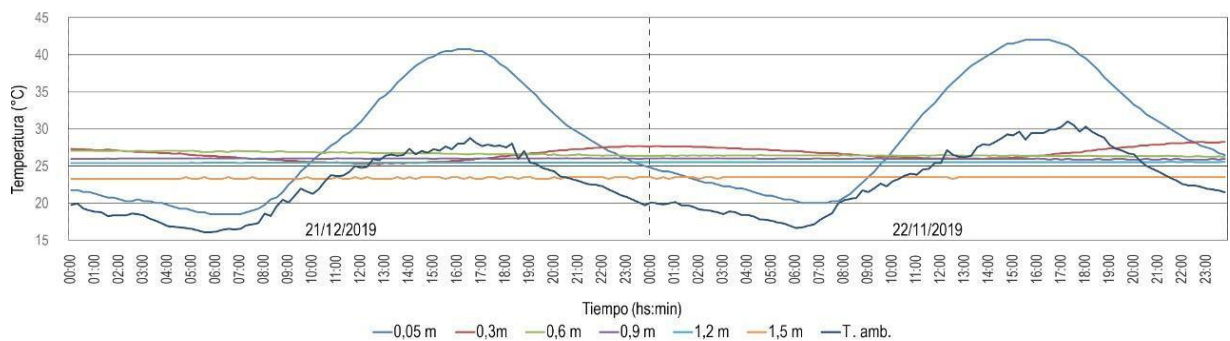


Figura 9: Temperaturas a diferentes profundidades en dos días de verano.

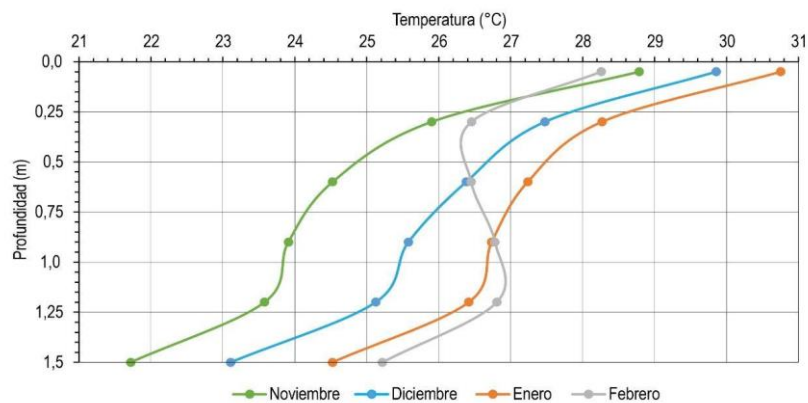


Figura 10: Temperaturas en profundidad por mes en verano.

El registro de datos se suspendió desde fines de marzo hasta mediados de junio, producto del aislamiento obligatorio en el país a causa de la pandemia por COVID-19 y se procede a analizar los datos de invierno.

- En la Figura 11, se observa que a profundidades de 1,5 m en invierno la temperatura oscila alrededor de los 20°C (o menos), recordemos que en verano teníamos temperaturas que llegaban a superar los 25°C. Sin embargo, avanzado el invierno, se espera que la temperatura a 1,5 m disminuya aún más conforme desciende la temperatura ambiente.
- Podemos observar que, a contraposición del verano, en invierno la temperatura máxima en el perfil del suelo se encuentra a mayores profundidades.
- Además, podemos asegurar que la profundidad máxima de registro de datos (1,5m) no es aquella en donde se produce la inversión de temperaturas ya que para esta profundidad los datos registrados son mínimos en invierno y máximos en verano.

En el Figura 12 se evidencia el aumento de temperatura en profundidad seguramente debido a que el calor del verano es retenido en las capas más profundas (recién estaría llegando el calor del verano a ese estrato). Otro aspecto interesante a resaltar es la variación de temperaturas entre cada uno de los puntos sucesivos en los que se tomó registro, podemos ver como en profundidad las temperaturas son más semejantes entre sí que más cerca de la fuente de calor (temp. ambiente). Este aspecto también apoya la hipótesis de que a partir de cierta profundidad la temperatura entre punto y punto ya no tendrá variación alguna.

En el Figura 13 vemos la influencia de la variación de temperatura ambiente a medida que el invierno avanza (mes a mes). Los cambios de temperatura más bruscos se ven en los primeros metros, siendo dicha variación semanal más uniforme a profundidades mayores.

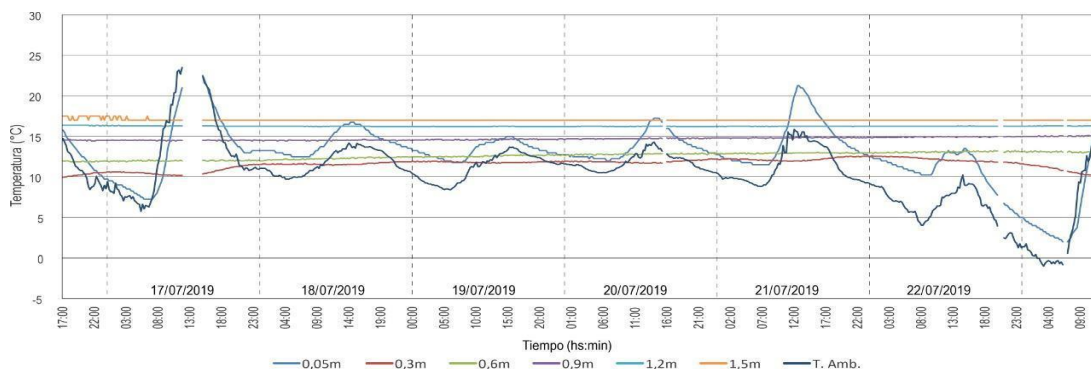


Figura 11: Temperaturas en función de los días para diferentes profundidades (invierno)

Finalmente, podemos estimar, a través del Figura 14 (en donde graficamos los promedios de verano e invierno), que la temperatura de equilibrio estaría entre los 20°C y 22°C ya que ambas curvas tienden a estos valores en profundidad pero a una distancia bastante mayor a la superficie que el metro y medio considerado.

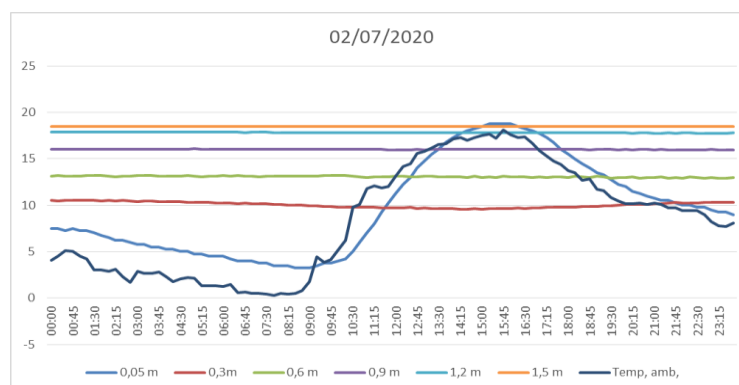


Figura 12: Temperaturas a diferentes profundidades en un día de invierno.

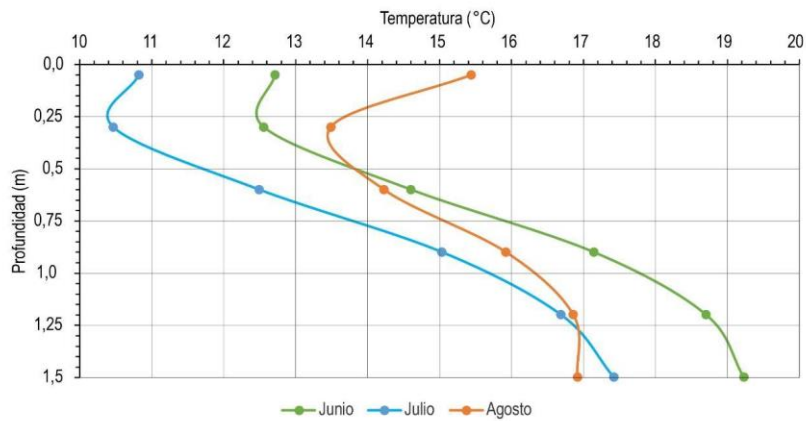


Figura 13: Temperaturas en profundidad por mes (invierno)

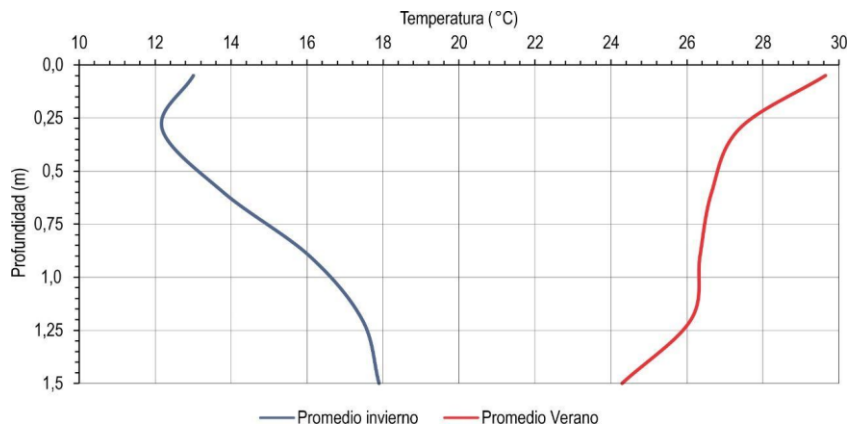


Figura 14: Temperaturas en profundidad promedio en verano e invierno

CONCLUSIONES

Se midió la variación de la temperatura en profundidad somera en un típico suelo limoso del centro de Argentina en período de verano e invierno, determinando los valores específicos de temperatura para cada estación y los desfasajes que se producen en el transcurso de períodos cortos (día) y en períodos largos (meses). Los resultados obtenidos evidencian el correcto funcionamiento de los sensores para esta aplicación, entregando mediciones esperadas en el rango de temperatura especificado y cumpliendo con las especificaciones propuestas por el equipo de trabajo. Los sensores mantuvieron un funcionamiento correcto, preciso y constante a lo largo de todo el proceso de medición. Los datos registrados de temperatura ambiente, de superficie y de humedad tienen validez para el análisis desarrollado en este trabajo. Los valores obtenidos permitirán realizar modelaciones de difusión térmica a mayores profundidades y con las características propias de este tipo de loess. Los valores obtenidos representan datos valiosos para el cálculo de la aplicación de geotermia somera de baja entalpía lo que permite diseñar y desarrollar sistemas capaces de aprovechar este tipo de energía con valores concretos para sondas horizontales o pozos canadienses/ provenzales instalados en el subsuelo somero (hasta 1,5 m de profundidad).

REFERENCIAS:

Andújar Márquez J. M., Martínez Bohórquez M. Á., & Gómez Melgar, S. (2016). Ground thermal diffusivity calculation by direct soil temperature measurement. Application to very low enthalpy geothermal energy systems. *Sensors*, 16(3), 306.

- Brandl H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique* 56(2):81–122.
- Brandl H. (1998). Energy piles for heating and cooling of buildings. Proc. 7th Int. Conf. Exhib. Piling and Deep Foundations, Vienna, 3.4.1–3.4.6.
- Carro Pérez M.; Peiretti A.; Francisca F.M.(2018). Energía geotérmica de baja entalpía en suelos loésicos: cálculo y diseño para caso de estudio. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA)*. Vol. 22, pp 04.23-04.34, 2018. Impreso en la Argentina ISSN 2314-1433.
- De la Bernardie, J., Bour O., De Dreuzy J. R., Guihéneuf N., Chatton E., Labasque T., & Le Borgne T. (2017). Characterization of shallow geothermal efficiency in fractured media through thermal tracer tests and numerical modeling. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (Vol. 19, p. 9109).
- Fu Y., Zhang C.Y., Zhang B. (2013). Benefits Analysis and Utilization Strategy for Development of Shallow Geothermal Energy: A Case Study of Tianjin. *Advanced Materials Research*. 616-618: 1640-1646.
- Glassley W. E. (2013). *Geothermal Energy. Renewable Energy and the Environment*. (A. Ghassemi, Ed.) (2nd ed., Vol. 5). Ney York: CRC Pres Taylor & Francis Group. <https://doi.org/doi:10.1201/b15566-10>.
- Iannelli L. y Gil S. (2012). Acondicionamiento térmico de aire usando energía geotérmica-ondas de calor. *Lat. Am. J. Phys. Educ.* 6(1):99-105.
- Johnston I.W., Narsilio G.A., Colls S. (2011). Emerging geothermal energy technologies". *KSCE Journal of Civil Engineering* 15(4):643-653.
- Koestoer, R. A., Saleh, Y. A., Roihan, I., & Harinaldi. (2019). A simple method for calibration of temperature sensor DS18B20 waterproof in oil bath based on Arduino data acquisition system. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2062, No. 1, p. 020006). AIP Publishing LLC.
- Lewis, A. J., Campbell, M., & Stavroulakis, P. (2016). Performance evaluation of a cheap, open source, digital environmental monitor based on the Raspberry Pi. *Measurement*, 87, 228-235.
- Sanner B. (2001). *Shallow Geothermal Energy. Lecture Notes: International Summer School on Direct Application of Geothermal Energy*. Division of Earth Science, Standford University, 21 pp.
- Sigal, A., Cioccale, M., Rodríguez, C. R., Leiva E.P.M. (2015). Study of the natural resource and economic feasibility of the production and delivery of wind hydrogen in the province of Córdoba, Argentina. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 4413-4425.
- Suckling, T. y Cannon R. (2004). Energy piles for Pallant House, Chichester, UK. *Ground Engng.* 37(7): 27–29.
- Xydis G.A., Nanaki E.A., Koroneos C.J. (2013). Low-enthalpy geothermal resources for electricity production: A demand-side management study for intelligent communities. *Energy Policy* 62, p. 118–123.

ABSTRACT

In this work, it is obtained the distribution of temperatures in shallow depths in the silty soils of the central part of Argentina during certain periods of the year (winter and summer), in the depths where the superficial foundations (plates and footings) of houses are usually built and where horizontal geothermal systems are installed. Useful values are obtained to evaluate the potential application and efficiency of shallow systems for low-enthalpy geothermal use in houses in central Argentina. The study of the temperature and moisture profile of the subsoil allows the design and modeling of systems capable of taking advantage of heat energy and reducing the environmental impact produced by conventional sources.

KEYWORDS: Loess, Low Enthalpy, Geothermal, Energy Efficiency.