

## **SIMULACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DEL SUELO A DIFERENTES PROFUNDIDADES**

**Celeste Gómez Rinesi, Ruben Spotorno, Hugo Zurlo, Gustavo R. Figueredo**

Grupo de Investigación en Tecnologías Energéticas Apropriadas (GITEA)

Facultad Regional Resistencia de la Universidad Tecnológica Nacional

French 414 - C.P. 3500 - Resistencia, Chaco.

Tel. 0362 456-5503 – e-mail: [celestegomezrinesi@gmail.com](mailto:celestegomezrinesi@gmail.com)

**RESUMEN:** Se presenta un modelo matemático para simular la evolución de la temperatura del suelo a diferentes profundidades en función del tiempo, utilizando la temperatura ambiente, la radiación solar y la velocidad del aire como variables temporales y las características físicas del suelo como constantes. También se midió y registró la temperatura del suelo, durante un extenso periodo, para realizar la comparación entre las mediciones realizadas en campo y las temperaturas del modelo. La temperatura del agua de red doméstica es aproximadamente igual a la temperatura del suelo que rodea a la cañería de distribución. Este dato es necesario para establecer el comportamiento energético de colectores solares, al representar la temperatura de agua de entrada al equipo, así como también para otras aplicaciones de aprovechamiento geotérmico que ayuden a disminuir el impacto ambiental proveniente de la utilización de fuentes convencionales de energía. La simulación se correlaciona bien con los datos medidos, observándose diferencias instantáneas máximas inferiores a 3°C con una diferencia promedio inferior a los 0,6°C y un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0,92.

**Palabras clave:** Temperatura del suelo. Simulación. Geotermia. Conducción. Transitorio.

### **INTRODUCCIÓN**

Las instalaciones solares térmicas destinadas a la producción de agua caliente sanitaria (ACS) poseen varias ventajas que actualmente las tornan muy atractivas. Entre las más relevantes podemos nombrar la reducción del consumo de hidrocarburos, disminución de las erogaciones monetarias y la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero, entre otras. El diseño y posterior comportamiento de una instalación solar depende de factores climáticos, de las características técnicas de los equipos, de las características del consumo de ACS y de la temperatura del agua de alimentación, cuyo perfil temporal y espacial actualmente se desconoce en nuestra región. Tiene gran interés determinar para una instalación de ACS solar la reducción del consumo de energía convencional, ya que de este parámetro y otros económicos dependerá el periodo de retorno de la inversión. Actualmente existen varios sistemas de cálculo que permiten estimar la reducción de consumo que se puede esperar de una instalación. Uno de los métodos más utilizado para estimar el comportamiento a largo plazo de un sistema solar es el denominado F-Chart. Otros software más sofisticados, como el TRNSYS, permiten incluso la simulación del sistema en régimen transitorio. En todos los casos necesitan como dato de entrada la temperatura del agua de alimentación.

La calidad del agua potable cambia durante el transporte a través de los sistemas de distribución. Los sistemas domésticos de agua potable (DDWS), que incluyen la tubería entre el contador de agua y los grifos del consumidor, son los puntos más críticos en los que la calidad del agua puede verse afectada. En las redes de distribución, la temperatura del agua potable y el tiempo de residencia del agua se consideran indicadores de la calidad del agua potable. En un artículo se describe una investigación experimental sobre la influencia del tiempo de estancamiento y el cambio de temperatura en la calidad del agua potable en un DDWS a gran escala. Se llevaron a cabo dos series de experimentos de estancamiento, durante los meses de invierno y verano, con varios intervalos de estancamiento (hasta 168 h de estancamiento). Se tomaron muestras de agua y biopelículas en dos grifos diferentes, una cocina y un grifo de ducha. Los resultados de este estudio indican que la temperatura y el estancamiento del agua afectan la calidad tanto química como microbiana en los DDWS, mientras que los parámetros microbianos en el agua estancada parecen estar determinados por la temperatura del agua dulce. La biopelícula formada en el tubo de ducha contenía más células totales e intactas que la biopelícula de la tubería de cocina. Se descubrió que las alfa proteobacterias dominan en la biopelícula de la ducha (78% de todas las Proteobacterias), mientras que, en la cocina, las bioproteínas Alphaproteobacteria, Betaproteobacteria y gammaproteobacteria se distribuyeron uniformemente (Zlatanovic, 2017).

Los sistemas domésticos de suministro de agua son la etapa final del proceso de transporte para entregar agua potable al grifo de los clientes. Bajo la influencia de la temperatura, el tiempo de residencia y los materiales de las tuberías, la calidad del agua potable puede cambiar mientras el agua pasa por el sistema doméstico. De acuerdo con la Ley Holandesa de Agua Potable, la temperatura no puede superar el umbral de 25°C en el punto de uso. En una publicación científica se proporciona un enfoque matemático para modelar el calentamiento del agua potable dentro del sistema de suministro de agua doméstica. Se estableció que el tiempo de residencia influye en la temperatura del agua potable más que la temperatura ambiente en sí (Moerman et al., 2014).

En otro estudio, se construyó un DDWS a escala real parecido a un sistema convencional y se ejecutó según un año de demandas estocásticas con un intervalo de tiempo de 10 segundos. La temperatura del agua potable se midió en cada punto de uso en los sistemas y el conjunto de datos se utilizó para la validación del modelo. El modelo de temperatura reprodujo adecuadamente los perfiles de temperatura, tanto en líneas de agua fría como caliente, en DDWS a escala real. El modelo mostró que la temperatura del agua de entrada y la temperatura ambiente tienen un gran efecto sobre la temperatura del agua en los DDWS (Zlatanovic, 2017).

También, se pudo constatar la relación de la temperatura del agua con la del suelo que le rodea, siendo efectivo igualarse la temperatura del suelo a la misma profundidad que se encuentra la cañería transportadora del agua doméstica (Blokker y Pieterse-Quirijns, 2013).

Por otro lado, la variación de la temperatura del subsuelo representa un dato valioso para el cálculo de instalaciones geotérmicas 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) (Carro Pérez, 2020).

Además, la temperatura de la superficie del suelo es un parámetro de interés en una variedad de estudios hidrológicos. La temperatura de la superficie y el flujo de vapor de agua asociado son condiciones de contorno importantes para los modelos atmosféricos (Best, 1998).

Establecer el comportamiento de las instalaciones solares para producir agua caliente sanitaria requiere conocer la variación mensual de la temperatura del agua de red, la que está estrechamente relacionada con la temperatura del subsuelo y los parámetros meteorológicos. En este trabajo se

presenta un modelo para predecir la temperatura del suelo a diferentes profundidades en función de los datos meteorológicos y se lo valida comparando con las mediciones de la temperatura del subsuelo a profundidades comprendidas entre los 0,50m y los 1,60m, en conjunción con los parámetros de una estación meteorológica, para la ciudad de Resistencia, Chaco.

## MATERIALES

*Sitio de estudio:* El sitio de estudio corresponde al Anexo de la Facultad Regional de Resistencia (FRRe) de la Universidad Tecnológica Nacional, ubicada en la Ciudad de Resistencia (Argentina). La perforación efectuada se encuentra en las coordenadas de latitud 27° 26' 52.9" S y longitud 58° 58' 31.7" O, a una altura aproximada de 50 m.s.n.m. El suelo de la zona está compuesto por materiales limo-arcillosos de granulometría fina, con escasa participación de arena fina, de color castaño claro que resultan ser tipo CL (clay low) (Torra, 2003).

La temperatura del subsuelo se midió con sensores de temperatura tipo Pt 100 dispuestos a 0,49 m, 0,78 m, 1,08 m y 1,58 m.

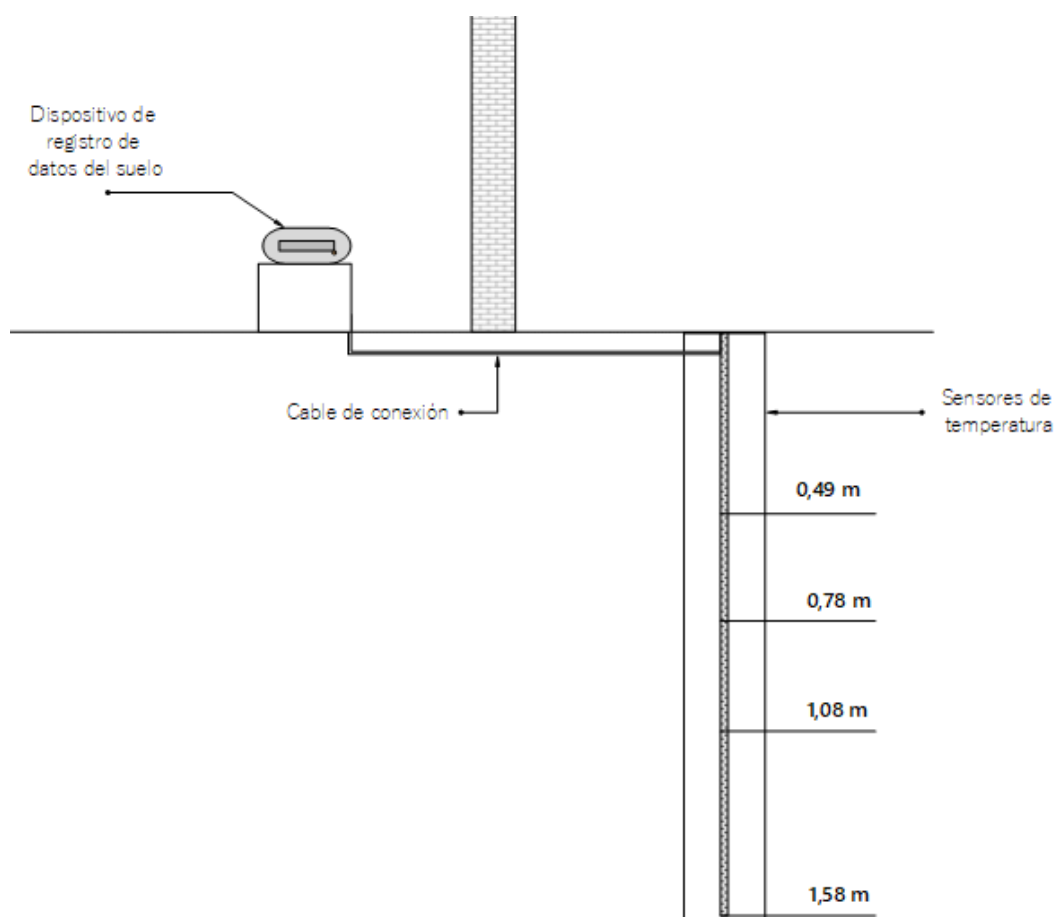


Figura 1. Esquema de sensores de temperatura

Para la medición de la radiación solar, temperatura ambiente, humedad relativa y la velocidad del viento se utilizó una estación meteorológica Davis Vantage Pro 2. Para medir la radiación, el equipo ofrece un rango de medición de 0 a 1800 W/m<sup>2</sup> y una exactitud del +/- 5%. Para medir la temperatura del ambiente se utilizó el mismo dispositivo que tiene una exactitud del +/- 0,3 °C. Tiene un rango de temperatura de -40 a 65 °C. Para la velocidad del viento el rango es de 0 a 89 m/s con una exactitud de +/- 0,9 m/s.

*Perforación y medición:* La perforación se realizó con una profundidad de 1,58 m, un diámetro de 0,2 m en una zona del terreno sin pendiente y con una incidencia de radiación solar media. Los datos de temperatura se registran cada 30 minutos para poder validar los resultados del modelo matemático.



*Figura 2. Perforación y colocación de sensores. 1) Conducto para protección de sensores. 2) Realización de la perforación. 3) Perforación con sensores*

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 la estación meteorológica del aeropuerto de Resistencia, latitud: 27° 26' 55" S, longitud: 59° 3' 10" O y altura: 52 m.s.n.m ubicado en una zona suburbana a 7,25 km al oeste del sitio principal de medición. También se comparó con los de la facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste ubicada en un parque dentro de la zona urbana en latitud: 27° 27' 49" S, longitud: 58° 59' 05" O y altura: 50 m.s.n.m. a 1,85 km al SO del GITEA.



*Figura 3. Ubicación de las estaciones meteorológicas consultadas en la ciudad de Resistencia*

## **METODOLOGÍA**

La temperatura del suelo se midió con intervalos de 30 minutos, mientras que los datos del clima cada 15 minutos, en la estación meteorológica del GITEA. Las propiedades del suelo fueron obtenidas de (Busso, 2012).

Propiedad	Valor	Unidades
$C_{p_{suelo}} \cdot \rho_{suelo}$	2850000	$J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$
k	0,88	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\alpha$	$3,09 \times 10^{-7}$	$m^2 \cdot s^{-1}$

*Tabla 1: Propiedades del suelo para Resistencia.*

*Modelo matemático:* Para el cálculo de la temperatura del suelo se utilizaron las ecuaciones para la conducción de calor en régimen transitorio en un sólido semi-infinito, agregando las características de las zonas urbanas.

Para la temperatura en la superficie del suelo se utilizó la ecuación para la conducción de calor en régimen transitorio, considerando además que al estar la superficie exterior en contacto con el aire existen flujos de calor por convección y radiación (Cengel, 2007):

$$T_0^{i+1} = \left(1 - 2\tau - 2\tau \frac{h_{ext}\Delta x}{k}\right) T_0^i + 2\tau T_1^i + 2\tau \frac{h_{ext}\Delta x}{k} T_{ext} + \frac{2\tau \dot{q}_{solar}\Delta x}{k} \quad (1)$$

Donde el número adimensional de malla de Fourier es:

$$\tau = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} \quad (2)$$

Para el modelo se consideró un intervalo de tiempo  $\Delta t = 3600s$  y un incremento en la profundidad  $\Delta x = 0,25 m$ . Se consideran 40 nodos, es decir, se calcula hasta una profundidad en la tierra de 10 m cada 1 hora.

Para iniciar la simulación, se necesita la condición inicial de temperatura en la superficie. El dato que se toma es la media mensual histórica del mes en el que se inicia el cálculo. En el caso de Resistencia, este valor es 26,8°C para el mes de enero.

En el último nivel más profundo  $T_{40}$ , se considera que la temperatura es constante y es igual a la temperatura promedio anual del ambiente en la ubicación. En el caso de la Ciudad de Resistencia, se tomó el valor de 21,5°C.

Para la condición inicial de las temperaturas intermedias, se realiza una interpolación entre la temperatura en  $T_0$  y  $T_{40}$ . La ecuación empleada para cada intervalo es:

$$T_i = T_{i-1} - \frac{T_0 - T_{40}}{40}$$

Para considerar las características del ambiente en zonas urbanas se adicionan a la ecuación los términos de la radiación neta ( $R_{neta}$ ), el calor de almacenamiento ( $\Delta Q_s$ ) y el flujo latente debido a la evaporación ( $L_v E$ ):

$$T_0^{i+1} = \left(1 - 2\tau - 2\tau \frac{h_{ext}\Delta x}{k}\right) T_0^i + 2\tau T_1^i + 2\tau \frac{h_{ext}\Delta x}{k} T_{ext} + \frac{2\tau \dot{q}_{solar}\Delta x}{k} + \tau(R_{neta} - \Delta Q_s - L_v E) \quad (3)$$

Para las medidas intermedias nodales de  $T_1$  a  $T_{39}$  se utilizaron las fórmulas de diferencias finitas considerando el caso sin generación de calor. Se enumeran los nodos del 0 al 40, con el nodo 0 sobre la superficie del suelo y el 40 la profundidad donde no existe variación de temperatura. Los nodos 1 al 39 son interiores y las formulaciones explícitas en diferencias finitas de estos nodos se obtienen directamente a partir de la ecuación:

$$T_m^{i+1} = \tau(T_{m-1}^i + T_{m+1}^i) + (1 - 2\tau)T_m^i \quad (4)$$

Siendo  $i$  el índice en el tiempo y  $m$  el índice de la profundidad. Por ejemplo, la temperatura en la profundidad  $T_1$  sería:

$$T_1^{i+1} = \tau(T_0^i + T_2^i) + (1 - 2\tau)T_1^i \quad (5)$$

*Convección del aire:* El espacio donde se realizaron las mediciones corresponde a un patio rectangular de aproximadamente 40m<sup>2</sup> con 3 lados cerrados por edificios de más de 3m de altura, por ende se desprecia el efecto del viento en la transmisión de calor. Se utilizan las ecuaciones para convección natural de flujo turbulento al tratarse de un gas. Partiendo del número de Nusselt, se emplea la ecuación para flujo externo de capa límite natural sobre placa plana:

$$Nu = 0,15 \cdot Ra^{1/3} \quad (10^7 \leq Ra \leq 10^{11}) \quad (6)$$

Luego la convección se despeja de la igualdad:

$$Nu = \frac{h_{conv} * L}{k} \quad (7)$$

*Radiación neta  $R_{neta}$ :* La radiación neta  $R_{neta}$  es la suma de la radiación de onda corta y la radiación entrante y saliente de onda larga.

$$R_{neta} = \sum_{i=1}^n (1 - a_i) R_{global} + \varepsilon \sigma (T_{atm}^4 - T_{SS}^4) \quad (8)$$

*Almacenamiento de calor ( $\Delta Q_s$ ):* El calor almacenado es la energía absorbida de un sistema urbano. Todas las superficies y objetos en un área absorben o liberan energía. (Grimmond y Oke, 1999)

$$\Delta Q_s = a_1 R_{neta} + a_2 \frac{\partial R_{neta}}{\partial t} + a_3 \quad (9)$$

Donde  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  son coeficientes empíricos para diferentes tipos de superficie obtenidos de (Agudelo-Vera et al., 2015).

*Flujo latente de calor debido a la evaporación ( $L_vE$ ):* El flujo de energía (calor latente) debido a la evaporación para cada superficie es calculado con la versión modificada para áreas urbanas de la ecuación Penman-Monteith. (Grimmond y Oke, 1991)

$$LvE = \frac{s (R_{net} + Q_F - \Delta Q_s) + \frac{C_p \rho V}{r_a}}{s + \gamma \left(1 + \frac{r_{ss}}{r_a}\right)} \quad (10)$$

Para el cálculo de la resistencia aerodinámica  $r_a$  se utilizaron las ecuaciones presentadas en el apéndice VI de (Agudelo-Vera et al., 2015).

## RESULTADOS

Se pudieron obtener mediciones de la temperatura del suelo a diferentes profundidades durante los meses de diciembre del 2019 hasta la actualidad. Con el modelo matemático se realizó una gráfica donde se puede comparar los valores obtenidos de las ecuaciones con los medidos en el grupo de investigación. En la Figura 4 se graficó el periodo de abril a septiembre (donde se obtuvieron datos más continuos) y se puede observar como el modelo se adapta a las diferentes temperaturas tomadas del suelo. En promedio para todo el período, los valores que se obtuvieron fueron los siguientes:

Profundidad	Modelo (°C)	Mediciones (°C)	Diferencia
0,50 m	22,12	21,50	0,65
0,75 m	22,76	22,00	0,75
1,00 m	23,31	22,69	0,62
1,50 m	24,23	23,58	0,65

Tabla 2: Comparación del promedio de temperaturas a distintas profundidades

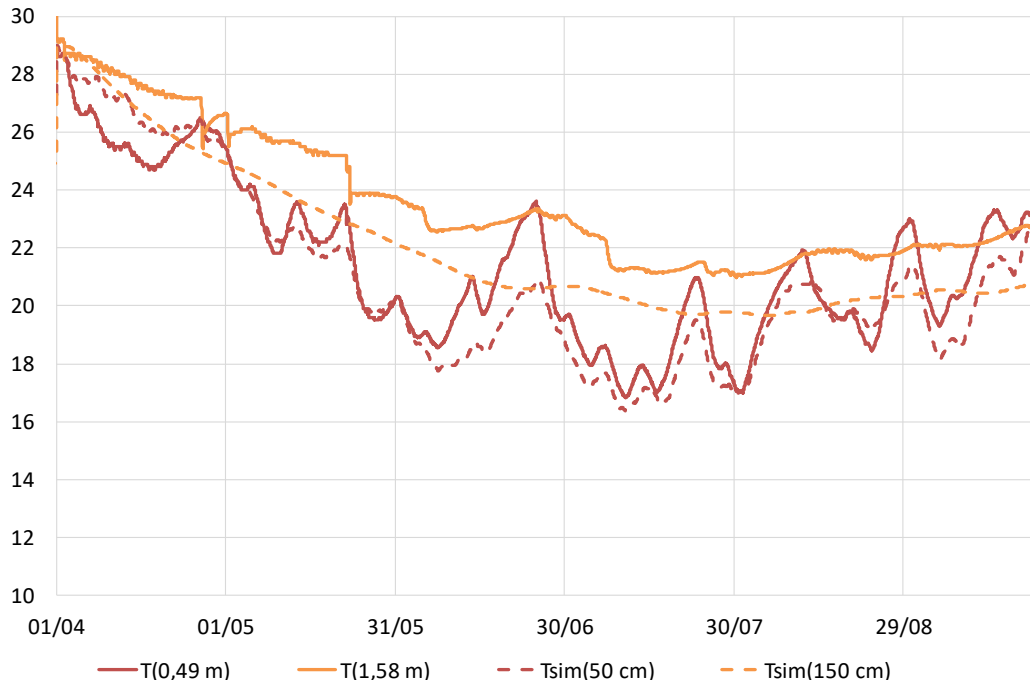


Figura 4: Temperatura del suelo a diferentes profundidades, medidas y simuladas para el periodo de abril a septiembre del 2020

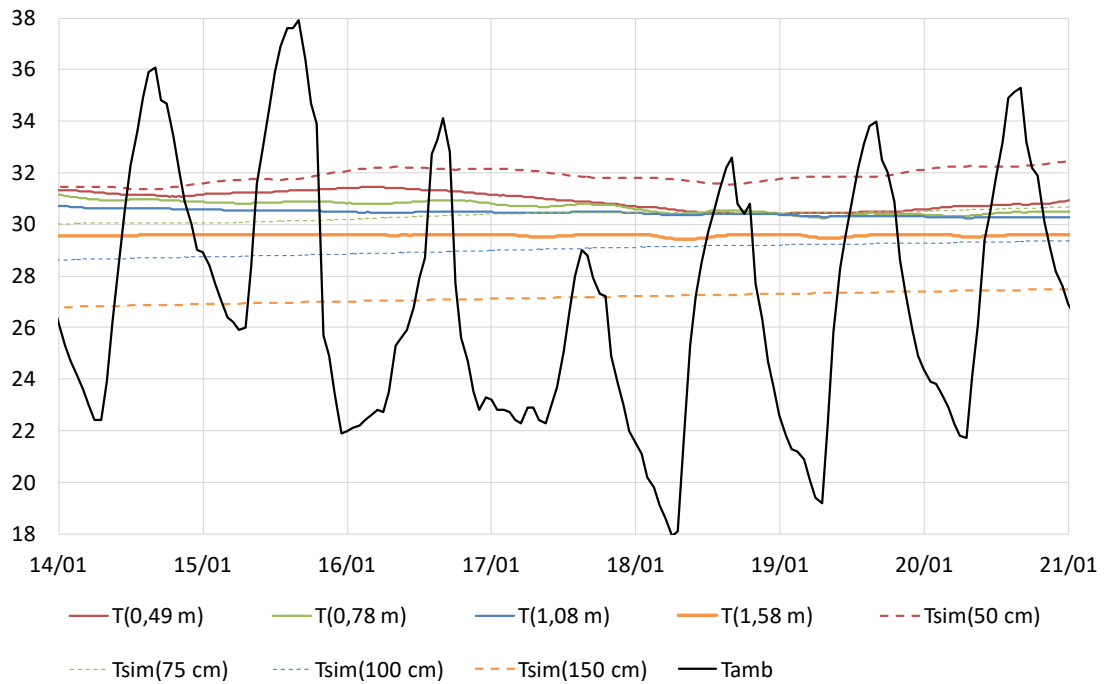
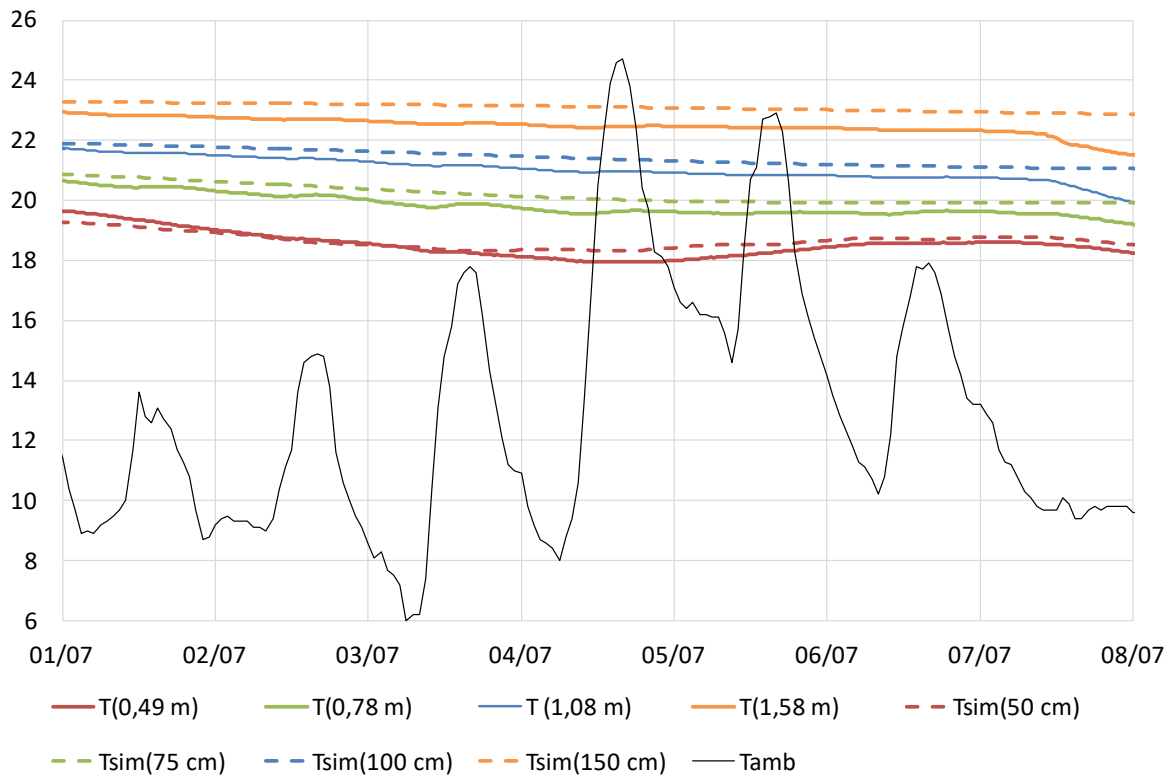


Figura 5: Temperatura del suelo a diferentes profundidades, medidas y simuladas y temperatura ambiente para 7 días cálidos

En la Figura 5 se comparan las temperaturas del suelo medidas a diferentes profundidades con los resultados de la simulación para aproximadamente las mismas profundidades, durante un periodo de una semana cálida del mes de enero en la ciudad de Resistencia. Se incluye además a modo de referencia la temperatura ambiente, que durante dicho periodo tuvo máximas comprendidas entre los 28°C y los 38°C y mínimas entre 18°C y 26°C. Se observa que la temperatura medida a 0,49m tiene un valor medio de aproximadamente 32°C con una pequeña amplitud inferior a 1°C. La temperatura simulada a 0,50m tiene un valor medio de aproximadamente 31°C con una amplitud ligeramente superior a los 1°C. La temperatura medida a los 1,58m permanece prácticamente constante en 29,5°C mientras que la simulada a 1,50m tiene una tendencia creciente con un valor medio de 26,5°C. La simulación arroja valores superiores en 1°C a la profundidad de 0,50m y por el contrario inferiores en 3°C a la profundidad de 1,50m. No se pudo comprobar si la discrepancia tiene relación con la humedad del suelo debido a que no se efectuaron mediciones de dicha variable.

En la Figura 6 se graficaron 7 días del mes de Julio, para analizar la variación dentro de los días más fríos del año. El modelo matemático puede adaptarse mejor a las temperaturas medidas, esto puede ser por la presencia que tienen la difusividad del calor y las altas radiaciones en los meses más cálidos que fríos.



*Figura 6: Temperatura del suelo a diferentes profundidades, medidas y simuladas y temperatura ambiente para 7 días fríos*

Por último, en la Figura 7, se graficó la temperatura a 0,5m, junto con su simulación, la irradiación diaria y la temperatura ambiente media diaria móvil. Se puede observar como la variación de la temperatura del suelo varía en menor proporción que la temperatura del ambiente, y también, las tendencias similares que tienen en el transcurso del tiempo. El modelo fue capaz de simular esta tendencia.



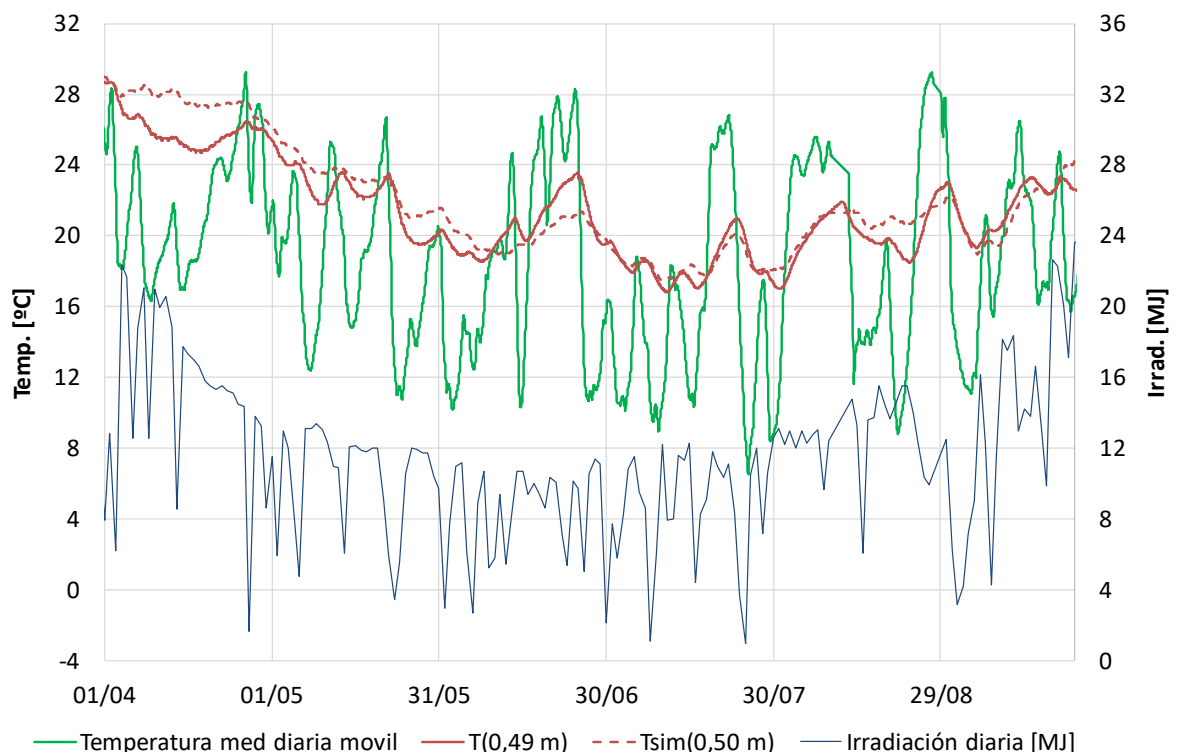


Figura 7: Temperatura del suelo a aproximadamente 0,50m, temperatura ambiente y radiación solar desde abril a septiembre

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El modelo presentado constituye una herramienta para predecir la temperatura del suelo a diferentes profundidades para un lugar determinado, en función de los datos del tiempo, como ser temperatura ambiente, velocidad del viento y radiación solar. Los resultados dependen fuertemente de las características (densidad, calor específico y conductividad térmica) y humedad del suelo, las que no se suelen conocer con suficiente exactitud. En la figura 8 se observa, para el periodo de abril a septiembre, la representación de la temperatura del suelo simulada a 0,5m en función de la temperatura medida para aproximadamente la misma profundidad, la diferencia máxima es inferior a 3°C y la diferencia media está por debajo de los 0,6°C y el coeficiente de determinación  $R^2$  de 0,92.

Para la ciudad de Rotterdam se midió la temperatura del suelo en 2 ubicaciones diferentes a 7 profundidades comprendidas entre los 0,01 m y 1,50m durante el periodo comprendido entre septiembre del 2013 y octubre del 2013. La comparación con los datos de temperatura del suelo simuladas da un error medio de aproximadamente 3°C con desviaciones de hasta 5°C en ocasiones puntuales (Agudelo-Vera et al., 2015).

Efectuando los promedios mensuales a las diferentes profundidades, se obtuvo una temperatura media del suelo a 1m de profundidad (medida) para el mes de julio de 20,2°C mientras que el valor análogo pero simulado es de 20,4°C observándose una discrepancia de 0,2°C. Para el mes de enero los valores son de 30,4°C y 28,6°C, medidos y simulados respectivamente.

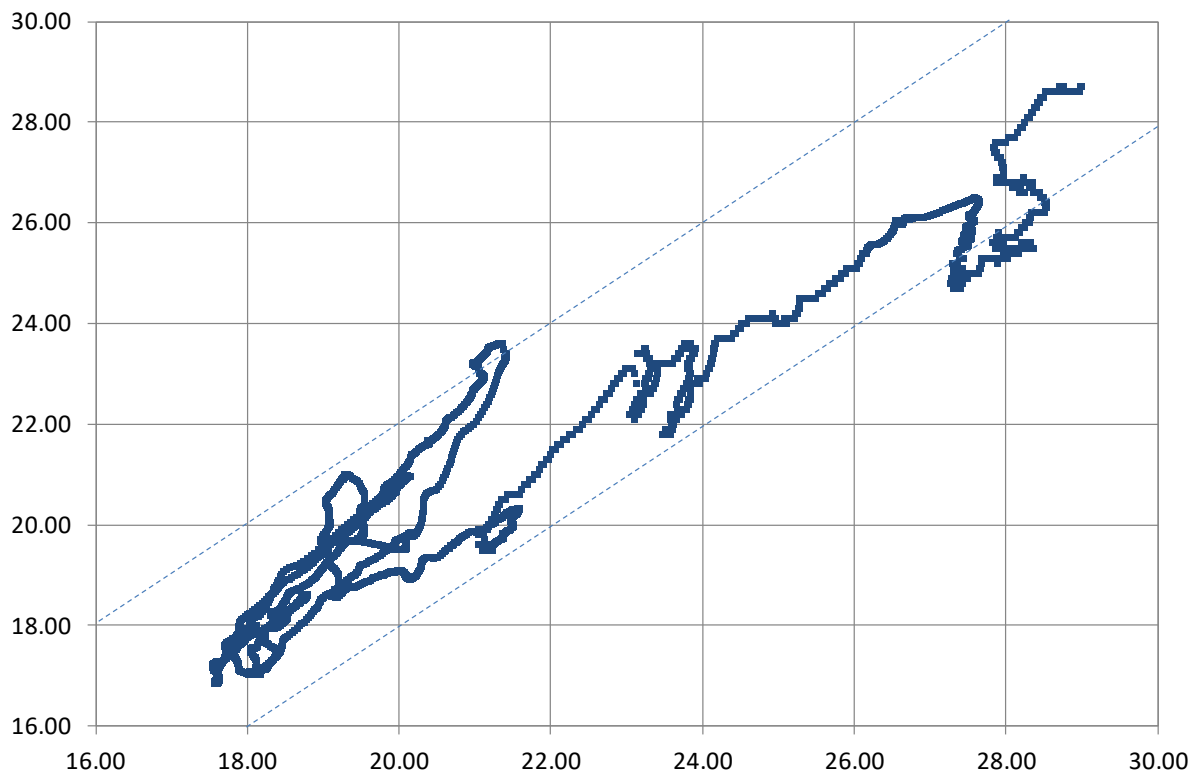


Figura 8: Temperatura del suelo a aproximadamente 0,50m simulada vs medida

Se realizó la medición de la temperatura del suelo en Breda en los Países Bajos a tres profundidades entre los 0,50m y los 1,25m y validaron un modelo que predice la temperatura del suelo con un error medio menor al 1% y un el coeficiente de determinación  $R^2$  de 0,93 y 0,96 para las profundidades de 0,5 y 1m respectivamente. (Blokker y Pieterse-Quirijns, 2013)

## CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Se modelizó y simuló la temperatura del suelo a profundidades inferiores a los 2m, en función de las características físicas del suelo y de los datos del tiempo medidos en una estación meteorológica. Se determinó la temperatura del subsuelo hasta una profundidad de 1,60 m, en un típico suelo limo-arcilloso de granulometría fina de la costa occidental del río Paraná en la ciudad de Resistencia en el Chaco. Se observa una buena correlación entre los datos medidos y simulados, obteniéndose un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0,92.

Se determinó que la temperatura del suelo, en Resistencia, a la profundidad a la que se instalan las cañerías de distribución de agua es de  $20\pm 1^\circ\text{C}$  durante el mes de julio y de  $29\pm 1^\circ\text{C}$  durante el mes de enero.

Siendo el objetivo final del proyecto, en el que se enmarca este trabajo, generar datos de temperatura del agua de red, a partir de los datos meteorológicos y el presente modelo matemático para la temperatura del suelo y posteriormente un modelo para la temperatura del agua de red en función del consumo y los parámetros meteorológicos.

## AGRADECIMIENTOS

Al departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste por proveernos los datos medidos en su estación meteorológica.

## NOMENCLATURA

$a_1$  : Valor empírico para estimar calor almacenado [-]  
 $a_2$  : Valor empírico para estimar calor almacenado [s]  
 $a_3$  : Valor empírico para estimar calor almacenado [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]  
 $a_i$  : Albedo de superficie tipo  $i$  [-]  
 $C_D$  : Coeficiente de arrastre en relación con la fricción de la velocidad y la temperatura [-]  
 $C_p$  : Capacidad calorífica del aire [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]  
 $C_{p,suelo}$  : Capacidad calorífica del suelo [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]  
 $g$  : Constante de la gravedad [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ]  
 $k$  : Coeficiente general de transferencia de calor [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ]  
 $L$  : Distancia por la que pasa el flujo de aire [m]  
 $L_vE$  : Flujo latente de calor debido a la evaporación [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]  
 $Nu$  : Número de Nusselt [-]  
 $\Delta Q_s$  : Calor de almacenamiento [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]  
 $Q_F$  : Calor antropogénico [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]  
 $Ra$  : Número de Rayleigh [-]  
 $r_a$  : Resistencia aerodinámica [ $\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ ]  
 $r_{ss}$  : Resistencia de la superficie [ $\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ ]  
 $R_{global}$  : Radiación global [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ]  
 $R_{neta}$  : Radiación neta [ $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ]  
 $T_{atm}$  : Temperatura atmosférica [K]  
 $T_{SS}$  : Temperatura de la superficie del suelo [K]  
 $t$  : Tiempo [s]  
 $\Delta x$  : Diferencia de profundidades [m]  
 $\rho$  : Densidad del aire [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]  
 $\rho_{suelo}$  : Densidad del suelo [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]  
 $\varepsilon_{ef}$  : Emisividad [-]  
 $\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67\text{E}^{-8}$ ) [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ ]  
 $\tau$  : Número de Fourier [-]

## REFERENCIAS

- Agudelo-Vera C., Blokker M., van der Wielen P. y Raterman B. (2015). Drinking water temperature in future urban areas. BTO report. Dirección URL: <<https://edepot.wur.nl/378158>> [consulta: 12 de agosto de 2021]
- Carro Pérez M.E., Pleitavino M., Mansilla B., Toledo R. B., Aratano Jalin S. y Bruni R. (2020). Evaluación de la distribución de temperaturas en un perfil somero de suelo loésico. ASADES, 24, 161-172.
- Cengel Y.A. (2007). Transferencia de calor y masa, 3ª edición, pp. 311-323. McGraw-Hill Interamericana. México.
- Berthier E., Mestayer P. G. y Herve A. (2006). Comparison of two evapotranspiration schemes on a sub-urban site. Journal of Hydrology, 328, 635-646.
- Best M. (1998). A Model to predict surface temperatures. Boundary-Layer Meteorology, 88, 279-306.
- Blokker E.J.M y Pieterse-Quirijns E.J. (2013). Modeling temperatura in the drinking water distribution system. American Water Works Association, 105, E19-E28.
- Busso A.J. (2012). Almacenamiento subterráneo de energía – UTES: Instalación del primer Borehole Heat Exchanger en Argentina y estudio de posibles usos de la tecnología para el ahorro energético en climatización.
- Grimmond C.S.B. y Oke T.R. (1991). An evaporation-interception model for Urban Areas. Water Resources Research, 27, 1739-1755.

- Grimmond C.S.B y Oke T.R. (1999). Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of Applied Meteorology*, 38, 1262-1292.
- Moerman A., Blokker M., Vreeburg J., van der Hoek J.P. (2014). Drinking water temperature modelling in domestic systems. *Procedia Engineering*, 89, 143-150.
- Torra, R. (2003). Geología del subsuelo del Área Metropolitana del Gran Resistencia (AMGR), Provincia del Chaco, Nordeste de Argentina. *CIÊNCIA E NATURA*, 25.
- Zlatanovic L., van der Hoek J.P. y Vreeburg J.H.G. (2017). An experimental study on the influence of water stagnation and temperature change on water quality in a full-scale domestic drinking water system. *Water Research*, 123, 761-772.
- Zlatanovic L., Moerman A., van der Hoek J.P., Vreeburg J. y Blokker M. (2017). Development and validation of a drinking water temperature model in domestic drinking water supply systems. *Urban Water Journal*, 123, 761-772.

**ABSTRACT:** A mathematical model is presented to simulate the evolution of soil temperature at different depths as a function of time, using ambient temperature, solar radiation and air speed as temporal variables and the physical characteristics of the soil as constants. The soil temperature was also measured and recorded to make a comparison between the measurements made in the field and the temperatures of the model. The temperature of the domestic water is approximately equal to the temperature of the ground surrounding the distribution pipe. This data is necessary to establish the energy behavior of solar collectors, by representing the temperature of the water entering the equipment, as well as for other geothermal exploitation applications that help to reduce the environmental impact from the use of conventional energy sources. The simulation correlates well with the measured data, observing maximum instantaneous differences lower than 3°C with an average difference lower than 0,6°C and a correlation coefficient  $R^2$  of 0,92.

**KEYWORDS:** Soil temperature. Modelling. Geothermal. Conduction. Transient.