



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

ACUMULACIÓN ESTACIONAL DE ENERGÍA SOLAR EN ACUÍFERO PARA ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO

Proyecto ANII FSE_1_2016_131880

Equipo Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial (IIMPI):

Dr. Ing. Pedro Galione (responsable),

Msc. Ing. Federico González

Dr. Ing. Pedro Curto

Ing. Lidio Braga

Equipo Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA):

Msc. Ing. Alfonso Flaquer (corresponsable)

Equipo Instituto de Estructuras y Transporte (IET):

Dr. Marcos Musso

Lic. Geología Leonardo Leite

Agradecimientos:

Agradecemos especialmente a Ind. Ind. Mec. Ángel Frioni y Mtro. Tco. Horacio Bardier por su disposición e invaluable asistencia con la resolución de aspectos del diseño del sistema hidráulico.

Asimismo, agradecemos a la ANII por su apoyo en la adjudicación de este proyecto FSE_1_2016_131880, sin el cual no hubiera sido posible.

Contenido

1	Resumen	1
2	Introducción	1
3	Instalación experimental	3
3.1	Dimensionamiento y modelo analítico	3
3.2	Acuífero Raigón	5
3.3	Descripción de la instalación experimental	6
3.4	Resultados obtenidos en la operación del sistema	10
3.4.1	Energía inyectada	10
3.4.2	Rendimiento de los colectores solares	15
3.4.3	Energía extraída	16
3.5	Variación de temperaturas en el acuífero	18
4	Caracterización de subsuelo y del acuífero de la instalación experimental	21
4.1	Ensayos de campo	21
4.1.1	Tomografías de resistividad eléctrica	21
4.1.1.1	Resultados	28
4.1.1.1.1	Tomografía 1	29
4.1.1.1.2	Tomografía 2	31
4.1.1.1.3	Tomografía 3	32
4.1.2	Piezometría	34
4.1.3	Ensayo de bombeo	36
4.1.4	Medición del perfil vertical de temperatura	37
4.2	Ensayos de laboratorio	39
4.2.1	Ensayos de granulometría, mineralogía, porosidad, densidad y conductividad hidráulica	39
4.2.1.1	Análisis de suelos	39

4.2.1.2	Propiedades físicas	40
4.2.1.3	Conductividad hidráulica (K)	43
4.2.1.4	Mineralogía	45
4.2.1.5	Conclusiones	45
4.2.2	Ensayo de conductividad térmica y determinación de capacidad térmica y porosidad (sedimento-agua)	46
4.2.2.1	Modelado simplificado y diseño del sistema	46
4.2.2.1.1	Configuración axial (tentativa inicial)	46
4.2.2.1.2	Configuración radial (final)	49
4.2.2.2	Modelado numérico del sistema	50
4.2.2.3	Montaje y resultados experimentales	55
4.2.2.3.1	Metodología de ensayo	57
4.2.2.4	Resultados	59
4.2.2.4.1	Densidad, porosidad, capacidad calorífica	59
4.2.2.4.2	Conductividad térmica	60
5	Modelación	63
5.1	Simulación con MDT3DS	64
1	Factor de retardo:	65
2	Coeficientes de difusión y dispersión	65
3	Fuentes y sumideros	66
5.2	Validación con casos de bibliografía	66
5.2.1	Moving ILS - two-dimensional conduction and advection	72
5.2.1.1	Comparativa entre MT3DS y MILSsd:	73
5.2.1.1.1	Caso 2D	73
5.2.1.1.2	Caso 3D	75
5.3	Simulación del caso experimental	76

6	Divulgación y difusión	77
7	Trabajo a futuro – Pasos a seguir	78
8	Referencias bibliográficas	79
9	Anexo - Detalle de los componentes de la instalación	83
9.1	Bomba hidráulica	83
9.2	Variador de frecuencia.	83
9.3	Colectores solares	84
9.4	Sensores de temperatura y altura de pozos (divers)	85
9.5	Sensores de temperatura	85
9.6	Piranómetro	86
9.7	Caudalímetro	86
9.8	Sistema de control y telemetría	87
9.9	Conversores de señal.	88

1 Resumen

El proyecto tiene como objetivo analizar la acumulación de energía térmica en acuíferos, utilizando la temporada de verano para calentar agua mediante colectores solar e inyectar agua caliente en el acuífero, para utilizarla en la calefacción de edificios durante la estación fría. El primer enfoque para modelar el comportamiento del acuífero se realiza mediante un modelo analítico, luego se diseña y construye un arreglo experimental para medir en campo el comportamiento de esta instalación. Los parámetros térmicos e hidráulicos del acuífero deben ser conocidos con precisión para aplicar modelos analíticos y numéricos, y para determinarlos se realizan ensayos de campo y laboratorio. En el sitio, se estudia el comportamiento del acuífero ante una inyección de agua caliente, calentada por colectores solares. Estas medidas se utilizan para analizar el comportamiento del acuífero y cuantificar la acumulación de energía solar, así como entradas para los modelos analíticos y numéricos. En paralelo, se trabaja en el modelado numérico del comportamiento fluidotérmico del acuífero, con el objetivo de obtener modelos que puedan ser utilizados para el diseño, optimización y predicción de comportamiento de otros sistemas en los que se utilice el intercambio de calor con el subsuelo.

2 Introducción

A medida que aumenta la demanda de energía, la conservación y utilización eficiente de la energía se vuelve crucial. En todo el mundo, las aplicaciones del sistema de almacenamiento de energía térmica (TES – Thermal Energy Storage) han demostrado proporcionar soluciones económicas y ecológicas a los problemas de energía y se ha prestado cada vez más atención a su utilización (Paksy et al., 2004), (Dincer and Rosen, 2007). A su vez, la utilización de energía térmica suministrada por fuentes renovables ha estado siempre relacionada con el problema de que la mayoría de estas fuentes suministran energía cuando la demanda del usuario es baja, por ejemplo, la energía solar térmica para calefacción, tiene la mayor disponibilidad en la temporada de verano, cuando la demanda de calefacción es pequeña.

Las tecnologías de energía solar térmica ofrecen un buen potencial para la calefacción de viviendas y producción de agua caliente sanitaria. De acuerdo con (Cruickshank, 2009), los sistemas térmicos son típicamente de dos a cuatro veces más eficientes que los sistemas

fotovoltaicos (PV). Por otra parte, la calefacción de viviendas y el calentamiento de agua son responsables de una gran parte de las necesidades energéticas de los edificios residenciales: alrededor del 80% en Canadá (NRCan, 2011) y el 82% en Europa (Linder and Bahr, 2007). Por tanto, existe un gran potencial en el uso de tecnologías de energía solar térmica para convertir la radiación solar en calor sensible utilizable.

Varias tecnologías de almacenamiento de energía térmica subterránea (UTES – Underground Thermal Energy Storage) se han desarrollado en los años recientes para encontrar nuevas soluciones que garanticen criterios de eficiencia y sostenibilidad económica de forma de poder utilizar con mayor eficacia las nuevas fuentes de energía renovables (solar, geotérmica, ambientales, etc.). (Nielsen, 2003).

Los sistemas UTES se suelen dividir en dos grupos. Por un lado, el almacenamiento de energía térmica mediante sondeos (BTES) (Novo et al., 2010), llamados sistemas "cerrados". Cuando el almacenamiento de energía se realiza en un medio acuífero se denomina (ATES) o sistemas "abierto", donde el agua subterránea (Novo et al., 2010) se extrae o se inyecta en el acuífero mediante el uso de pozos para llevar la energía térmica dentro y fuera del acuífero.

Estos sistemas se han utilizado con éxito en todo el mundo para el almacenamiento temporal de calor y frío con el propósito de calefacción y / o refrigeración en invernaderos, residencias e industrias. Numerosas instalaciones se encuentran en operación en Suecia, Alemania, Holanda, Bélgica y otros países europeos.

(Hooper, 1955) indicó que un sistema de calefacción solar con una fracción solar del 100% (la fracción solar es la relación entre el calor usado para calefacción y el calor usado para calentar agua de usos domésticos en base a un sistema a base de energía solar respecto de los requerimientos totales de calefacción) para un hogar canadiense usando un almacenamiento estacional requeriría 25% de la superficie del colector necesaria para el mismo tipo de sistema equipado con el almacenamiento a corto plazo.

En Uruguay no existen experiencias de este tipo a la fecha, por lo que el potencial de desarrollo y aplicación de estas tecnologías de amplio uso a nivel mundial es significativo.

3 Instalación experimental

La instalación experimental cuenta con dos pozos de producción, uno para la extracción y otro para la inyección de agua del acuífero. Por otra parte, un total de 5 pozos se utilizan para medir la temperatura y el nivel piezométrico del acuífero en las inmediaciones del pozo de inyección. En este último también se miden estas cantidades. Además, se mide y controla el caudal de bombeo del sistema, las temperaturas del agua a la entrada y salida de los paneles solares y radiación solar.

El agua es extraída del acuífero y el calentamiento del agua se realiza mediante paneles solares y luego se inyecta en la zona donde se monitorea temperatura y nivel piezométrico, lejos de la extracción para evitar recirculación. El caudal de diseño del sistema es de $1 \text{ m}^3/\text{h}$, incrementando la temperatura a la que se extrae el agua, 18°C , buscando llegar a 40°C . Según la energía solar disponible, el sistema ajusta el caudal mediante una lógica de control diseñada para que la temperatura de salida de los paneles se mantenga en el entorno de 40°C .

3.1 Dimensionamiento y modelo analítico

El dimensionamiento de la distribución de los pozos monitores y de los caudales de inyección se realizó utilizando un modelo analítico, presentado a continuación. A partir de este modelo se estimó las variaciones de temperatura en el subsuelo frente a la inyección de agua caliente proveniente de los colectores solares. Mientras que la temperatura de inyección se determinó en 40°C , límite recomendado para evitar disolución de sales, el caudal se ajustó considerando esta temperatura y el área de colectores. Esta última limitada por el presupuesto disponible para la implementación de la instalación.

Stauffer et al. (2014), analiza varios modelos para el uso térmico de sistemas de agua subterránea. Aplicando la teoría de la fuente en movimiento a un modelo bidimensional, que considera la advección y la conducción, se obtiene la solución analítica para la respuesta de una fuente, de longitud infinita a lo largo de la dirección vertical, con un flujo de calor uniforme por unidad de longitud del pozo (pozo de inyección). Este modelo es llamado MILS y permite calcular la temperatura en un plano perpendicular a la línea infinita de inyección/extracción de calor luego de transcurrido un tiempo. Para ello se considera el parámetro constante que representa el calor inyectado por unidad de largo del pozo, siendo que este modelo se utiliza para representar las

variaciones de temperatura en un corte 2D del acuífero, sin considerar los efectos de borde de la zona superior e inferior. El modelo resulta en la siguiente ecuación:

$$T(x, y, t) = T_0 + \frac{q_{tb}}{4\pi C_m \sqrt{D_{t,L} D_{t,T}}} \int_0^t \exp \left[\frac{-(x - u_t(t-t'))^2}{4D_{t,L}(t-t')} - \frac{y^2}{4D_{t,T}(t-t')} \right] \times \frac{dt'}{(t-t')} \quad (\text{eq. 1})$$

donde $D_{t,L}$ y $D_{t,T}$ son los coeficientes de difusividad térmica longitudinal y transversal, respectivamente, los cuales incluyen los efectos de la dispersión térmica (β_L y β_T) y la velocidad térmica del acuífero u_t .

$$D_{t,L} = D_t + \beta_L u_t \quad (\text{eq. 2})$$

$$D_{t,T} = D_T + \beta_T u_t \quad (\text{eq. 3})$$

La velocidad térmica del acuífero se define a partir vector de descarga del acuífero (velocidad media del acuífero o velocidad de Darcy, q) y de la relación entre la capacidad térmica volumétrica del agua y del acuífero (C_w y C_m).

$$u_t = q C_w / C_m \quad (\text{eq. 4})$$

El modelo es utilizado para predecir el comportamiento de una sección plana del acuífero frente a la inyección de agua caliente, y así dimensionar el arreglo experimental que se construye para realizar las medidas en campo. La temperatura del agua se fija en un máximo de 40°C, límite recomendado por aspectos ambientales en el acuífero. Luego, se plantean varios escenarios con distintos caudales, buscando que el acuífero logre una variación en la temperatura apreciable en las inmediaciones del pozo de inyección.

El modelo analítico se utiliza para evaluar la extensión y variación de la temperatura en el acuífero, el dimensionamiento del monitoreo en cuanto a la ubicación de los pozos monitores, y en cuanto al incremento de la temperatura por temas de apreciación del instrumental (*divers*). Se encontró que con una temperatura de inyección de 40°C y un caudal de 1m³/h, se obtienen los incrementos mostrados en la Figura 1, luego de una temporada de calor inyectando. Se observó que luego de, algo menos de tres meses de inyección, el acuífero llega a un régimen estacionario, y la temperatura del mismo deja de aumentar. El caudal considerado viene asociado al área disponible para la instalación de paneles y al tipo de paneles, además del alcance en

dimensiones y presupuesto del proyecto. La Figura 1 muestra el incremento de temperatura en función de la posición, donde el flujo del acuífero es de oeste a este.

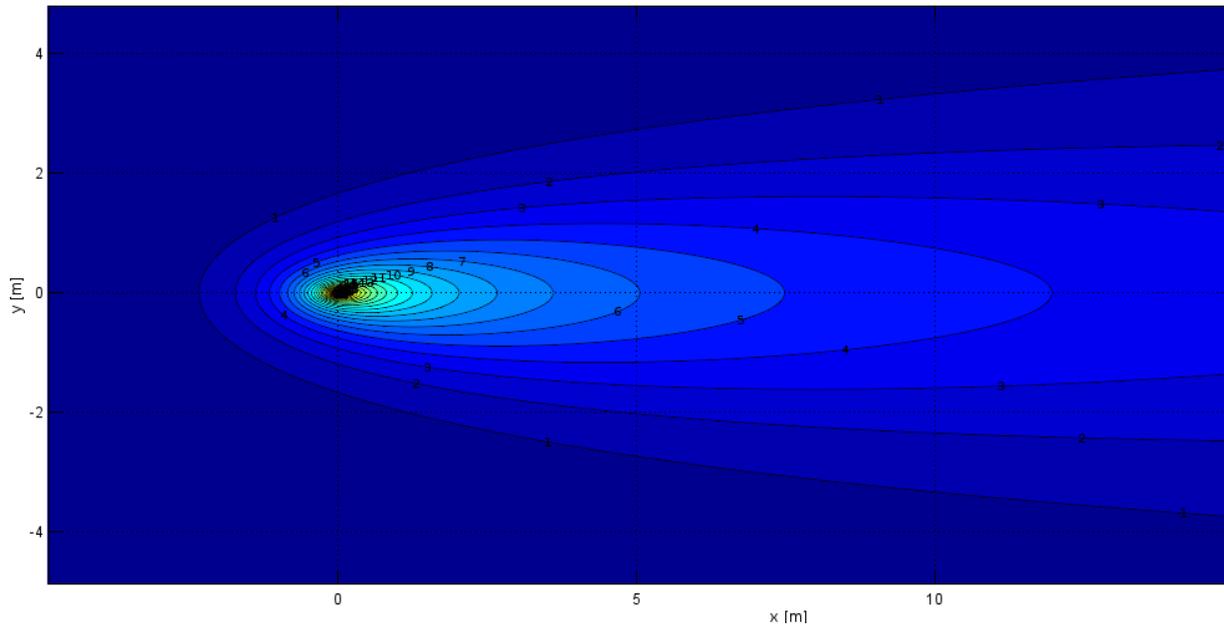


Figura 1: Incremento de temperatura del acuífero luego de la inyección de agua caliente.

3.2 Acuífero Raigón

La instalación se emplaza sobre el acuífero Raigón en la localidad de Colonia Wilson, departamento de San José, Uruguay. Se trata de un acuífero sedimentario, compuesto principalmente de arenas y gravas, con una extensión de aproximadamente 2300 km². En la zona el acuífero se comporta como libre y es altamente productivo, con caudales específicos del orden de 15 m³/h/m. La transmisividad del medio es del orden de 200 m²/día, el espesor saturado es de aproximadamente 15 m y la velocidad de Darcy (caudal por unidad de área) del flujo subterráneo en la zona es de 0,013 m/día.

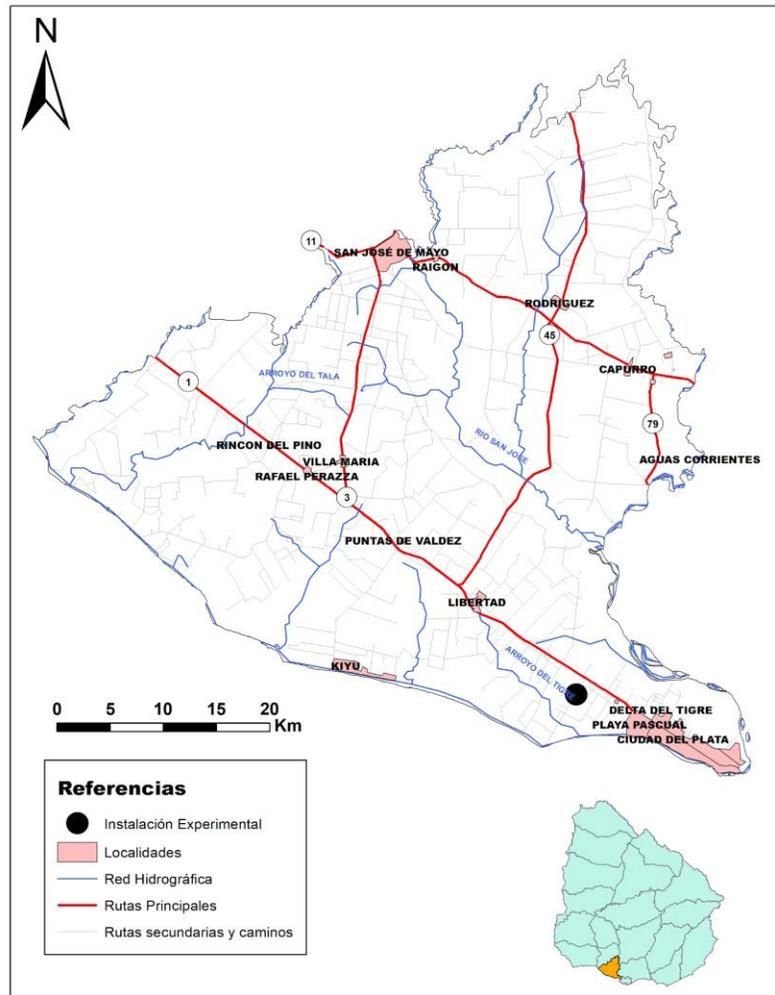


Figura 2: Ubicación de la instalación experimental sobre el Acuífero Raigón.

3.3 Descripción de la instalación experimental

El modelo analítico fue utilizado para analizar la respuesta del acuífero frente a la inyección de agua caliente y dimensionar la instalación. Luego de determinar el caudal y la temperatura de inyección se localizan los pozos monitores donde se mide la temperatura en las inmediaciones de la zona de inyección de agua caliente.

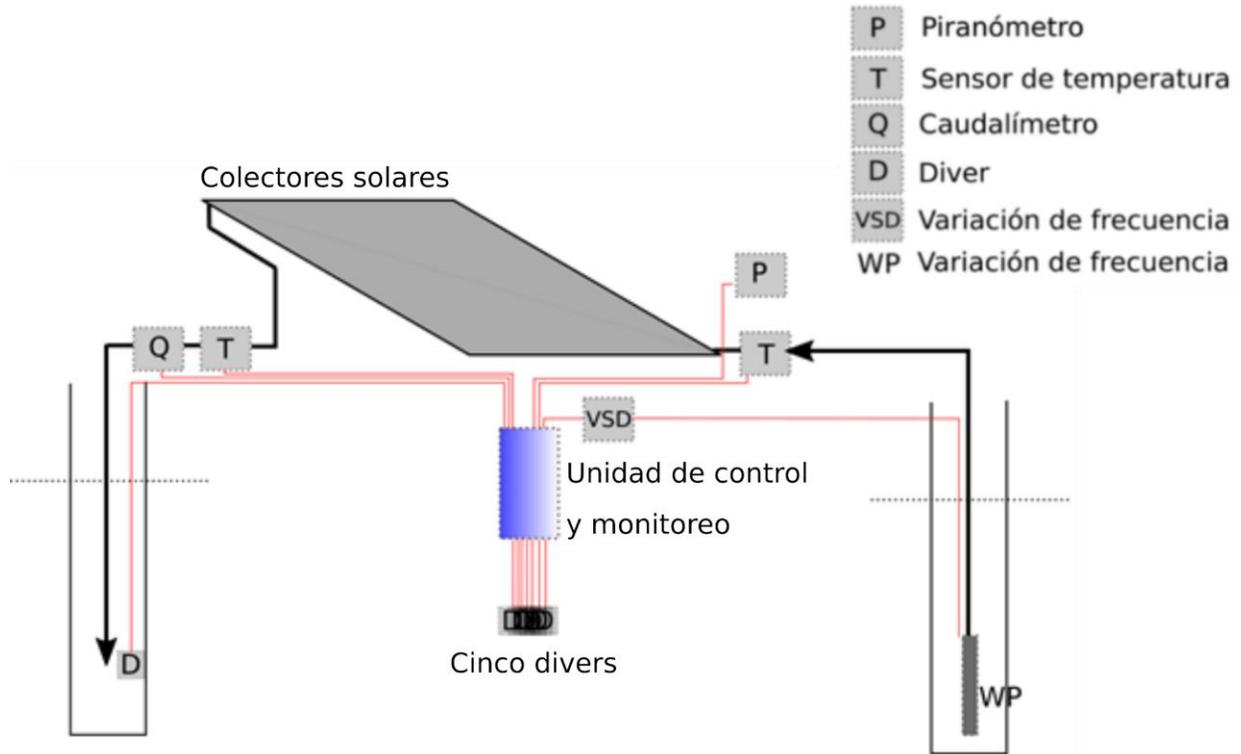


Figura 3: Esquema de la instalación.

El agua se extrae del acuífero, se hace circular por calentadores solares, mientras que la temperatura es censada a la entrada y salida de los mismos, y luego se inyecta en la zona del acuífero que se plantea calentar. Los *divers*, esquematizados en la Figura 3, censan la temperatura y nivel en el pozo de inyección y en 5 pozos a su alrededor. Estas mediciones se realizan a 22 m bajo la superficie, unos 7 m dentro del acuífero. Se dispone de un piranómetro y un caudalímetro que complementan los instrumentos de medición de la instalación.

La Figura 3 muestra esquemáticamente el arreglo de la instalación experimental con sus componentes y la Figura 4 la disposición de los pozos.

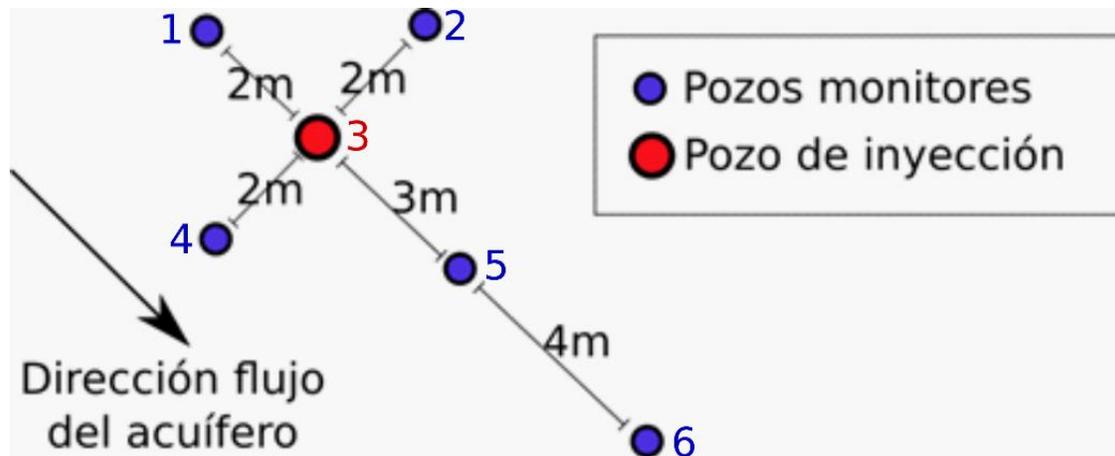


Figura 4: Esquema de la disposición de los pozos de medición alrededor del pozo de inyección

La instalación es monitoreada y controlada con un sistema de telemetría, el cual permite ver las medidas en tiempo real, guardar el histórico de medidas y modificar la lógica de control que opera sobre el sistema, el cual fue diseñado para modificar el caudal de inyección buscando que el agua caliente de inyección sea lo más próximo posible a los 40°C.

El pozo de extracción se ubica a una distancia suficiente de la zona de inyección, de forma de no producir alteraciones por el bombeo en la zona de inyección y evitar efectos de recirculación de agua caliente en el acuífero. En base a las características del acuífero, la extensión del predio disponible para la implantación del experimento y el caudal de funcionamiento, el pozo de extracción se ubicó a 70 m del pozo de inyección.

El caudal de agua nominal es establecido en 1 m³/h y pasa por colectores solares de plástico sin cobertura que ocupan un área de 30m², con lo cual se logra una temperatura de aproximadamente 40 °C a la salida del colector cuando la radiación solar es máxima.



Figura 5: Vista área de la zona y esquema de los componentes.



Figura 6: Colectores solares sobre el techo de la escuela.



Figura 7: Caja de válvulas, sensores de temperatura y caudalímetro.



Figura 8: Sistema eléctrico siendo instalado.

Todas las medidas registradas permiten analizar el comportamiento del acuífero frente a la inyección de agua caliente, y posteriormente, durante la temporada de invierno, el comportamiento al extraer el agua caliente acumulada para su uso en calefacción. Pero también,

las mediciones de radiación, caudal y temperaturas a la entrada y salida de los colectores, dan otros resultados de interés como la eficiencia de los colectores y la energía inyectada y extraída.

Debido a varios imprevistos y complejidades que presentó la instalación durante la temporada de verano 2018-2019 (de origen hidráulico, del instrumental, de la comunicación remota, etc.), la operación del sistema presentó intermitencias. Para la temporada 2019-2020 la instalación quedó completamente operativa y se logró acumular energía durante la temporada de verano y luego la extracción de dicha energía.

3.4 Resultados obtenidos en la operación del sistema

El sistema ha aportado energía al acuífero y es posible cuantificarla a partir de los datos medidos y ver el impacto que tuvo sobre las temperaturas del mismo. Inicialmente se consideran las dos temporadas de calor durante las que se inyectó agua caliente al acuífero. Ambas cubren la misma cantidad de días aproximadamente.

- Primera temporada: desde 24/10/2018 hasta 1/4/2019
- Segunda temporada: desde 16/10/2019 hasta el 23/3/2020

Mientras que en la primera temporada el funcionamiento de la instalación fue parcial, en la segunda se logró inyectar agua caliente prácticamente en la totalidad del periodo y según las especificaciones previstas.

3.4.1 Energía inyectada

A partir de las medidas de caudal y de la temperatura de salida de los colectores (*tempout*), calculamos la energía que fue inyectada como:

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p(T - T_{ref}) \quad (\text{eq. 5})$$

Se considera como temperatura de referencia, la temperatura del acuífero antes de ser modificado, siendo 18°C. Como el objetivo de la inyección es calentar el acuífero, al tomar esta temperatura de referencia se asegura que la energía inyectada es positiva solo si la inyección se realiza a una temperatura mayor que la natural del acuífero. La energía inyectada en la primera temporada resulta:

$$E_{temp\ 1} = 4,68E3\ kWh$$

Para comparar este valor con la energía disponible en el recurso solar se consideran los datos de radiación presentados en la Figura 9. Los mismos son obtenidos del Laboratorio de Energía Solar (LES) y corresponden a la locación geográfica de Colonia Wilson (latitud: $-34,7^\circ$, longitud: $-56,5^\circ$) en plano horizontal. La inclinación del techo donde se encuentran los paneles es aproximadamente 5° por lo que la comparación con la irradiación incidente en plano horizontal es razonable. Estos datos de radiación surgen del trabajo (Alonso-Suárez, 2014), donde se detalla la metodología de cálculo.

De la radiación promedio diaria para cada mes, y considerando el periodo de la primera temporada podemos calcular la energía disponible. Entonces, la energía total disponible sobre los $30\ m^2$ de colectores solares durante este periodo es:

$$E_{disp_temp\ 1} = 3,05E4\ kWh$$

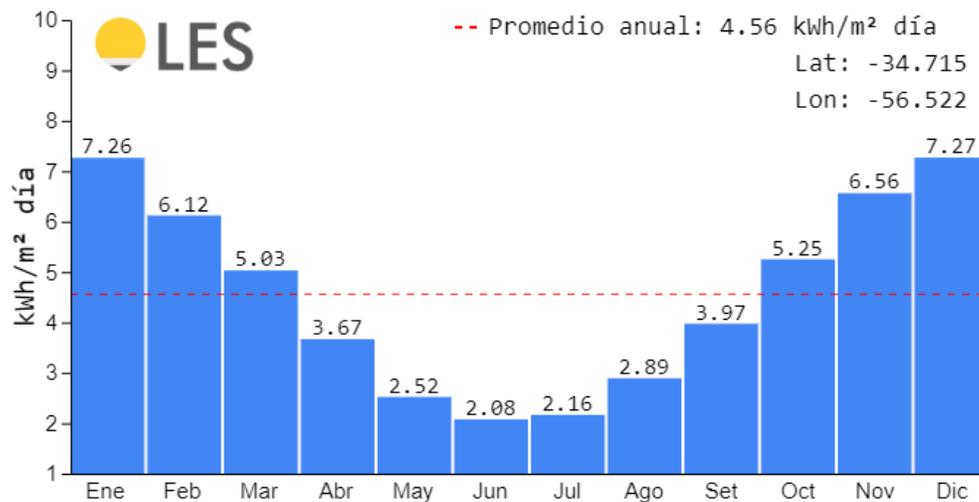


Figura 9: Irradiación mensual solar en plano horizontal para la locación de Colonia Wilson. Fuente: Laboratorio de Energía Solar (LES).

Es de interés calcular el porcentaje de energía disponible que fue inyectado en el acuífero. Este porcentaje de energía solar (PS) para el primer año resulta:

$$PS_{temp\ 1} = \frac{E_{temp\ 1}}{E_{disp_temp\ 1}} = 15,3\%$$

Hay varios motivos que provocan que la fracción solar no sea mayor. Como se puede ver en la Figura 6, el techo no se encuentra orientado perfectamente hacia el norte, por lo que se reduce

la energía que van a recibir los colectores. Por otro lado, el funcionamiento planteado para el sistema impone que la temperatura de inyección se mantenga en 40°C. Esto produce que en momentos de baja radiación no se cumpla esta condición, y la energía disponible en estos casos no sea aprovechada. Por último, el sistema durante la primera temporada tuvo interrupciones debido a inconvenientes de operación mencionados anteriormente, por lo que no estuvo en funcionamiento durante varios periodos.

Procediendo de esta manera se puede realizar los cálculos para la segunda temporada. Se obtienen los siguientes resultados:

$$E_{disp_temp\ 2} = 3,06E4\ kWh$$

$$E_{temp\ 2} = 8,45E3\ kWh$$

$$PS_{temp2} = 27,6\%$$

La energía solar disponible varía muy levemente de una temporada a otra y se debe a que los periodos son similares pero no exactamente iguales. La fracción solar, sin embargo, es sensiblemente mayor debido a que el sistema operó de forma más sostenida en la segunda temporada logrando inyectar más energía.

En la Figura 10 se muestra la distribución mensual de la energía inyectada al acuífero para cada temporada. Si bien en la temporada 2 el sistema estuvo funcionando correctamente la mayoría del tiempo, en diciembre y febrero se tuvieron algunos inconvenientes que impidieron el correcto funcionamiento durante, aproximadamente, 4 días en cada uno de estos meses, días en los que no se pudo aprovechar la energía correctamente.

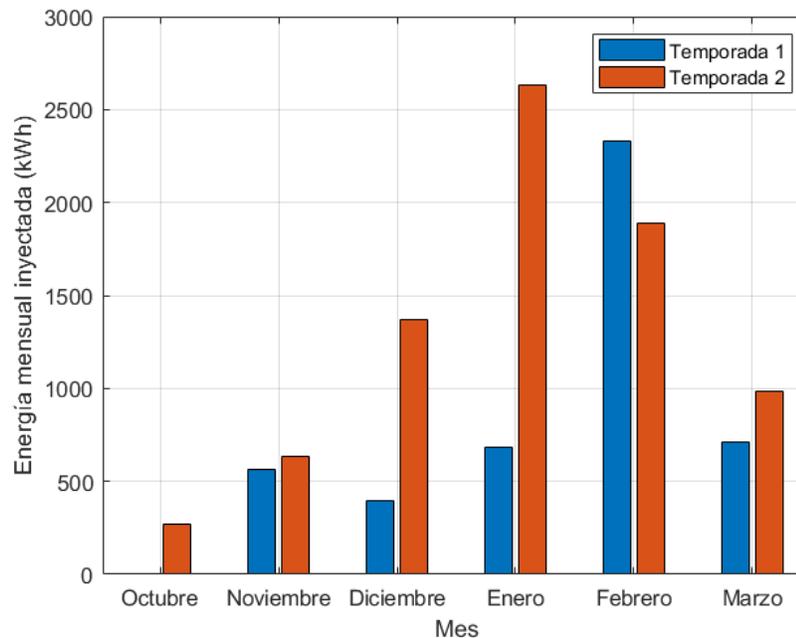


Figura 10: Energía mensual inyectada en el acuífero.

Luego de procesar todas las variables durante ambos periodos de inyección se calcularon otros resultados con el fin de analizar las características de la inyección de agua caliente. Por un lado, se calculó el volumen de agua en cada día y el tiempo de bombeo asociado. Además, se calcula la energía diaria y la temperatura media de inyección durante el bombeo de agua caliente. De esta forma se calcula estas 4 cantidades para los días de inyección y para ser presentados se realiza el promedio diario mostrado en la Tabla 1.

Tabla 1: Datos de inyección para temporada 1 y 2.

	Volumen diario (m ³)	Tiempo de inyección (hs)	Energía diaria inyectada (kWh)	Temperatura media de inyección (°C)
Temporada 1	3,47	3,5	35,4	26,6
Temporada 2	2,35	4,9	53,5	35,5

Se distingue que en la primera temporada el volumen de inyección diario fue mayor. Esto surge por complicaciones en la operativa hidráulica y en la lógica de control por las cuales no se logró inyectar caudales pequeños y fue necesario bajar la temperatura de inyección, efecto que se distingue en la temperatura media de inyección. Para la segunda temporada este inconveniente fue resuelto y fue posible inyectar agua a la temperatura deseada y con regulaciones de caudal más finas. Además del aumento de temperatura media de inyección, se logró aprovechar

situaciones de baja radiación (y bajo caudal) aumentando, también por este motivo, la energía aprovechada e inyectada al acuífero.

En las Figura 11 y Figura 12 se observa la variación instantánea durante todo el periodo de inyección para ambas temporadas. La temperatura en el pozo de inyección es llamada “T3” y la temperatura a la salida de los colectores es “Tout”. En la Figura 11 se ven varias anomalías en la temperatura T3 debido a problemas en los sensores y la comunicación inalámbrica. De todas formas, se puede distinguir como la temperatura comienza en los 18°C y, hacia el final del periodo, supera los 25 °C.

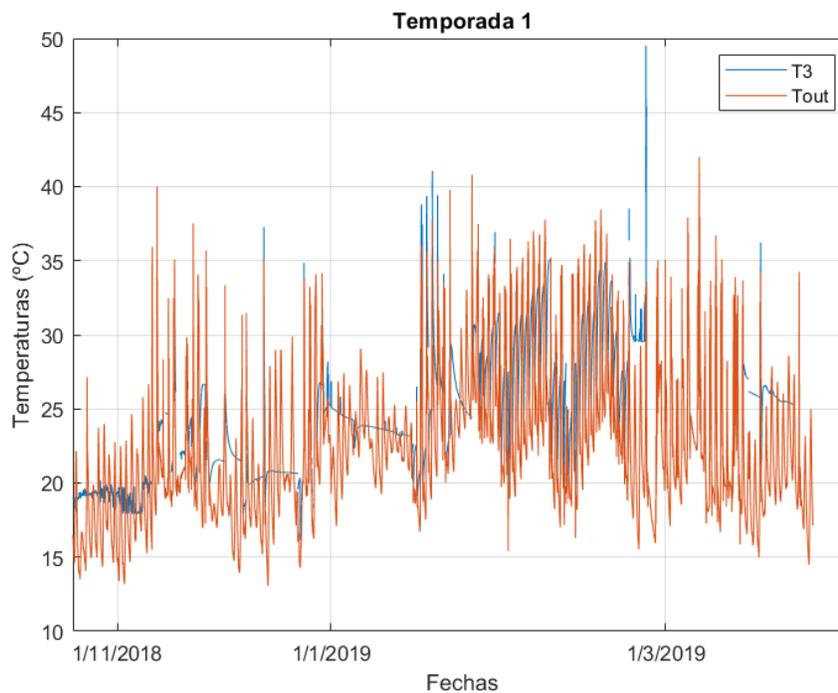


Figura 11: Temperatura instantánea en el pozo de inyección (T3) y a la salida de los colectores (Tout) durante la temporada 1.

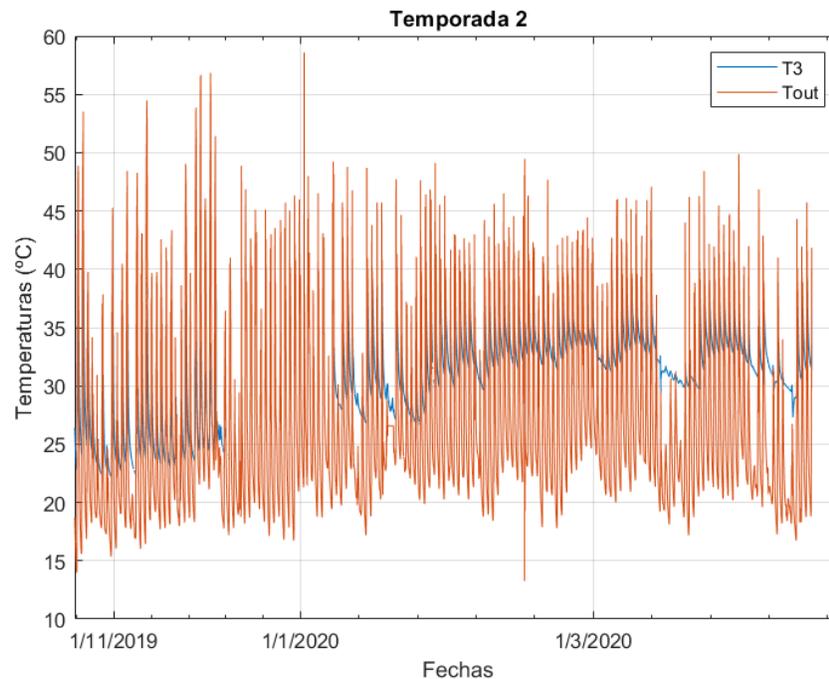


Figura 12: Temperatura instantánea en el pozo de inyección (T3) y a la salida de los colectores (Tout) durante la temporada 2.

3.4.2 Rendimiento de los colectores solares

La mayor parte de la energía solar incidente que no es aprovechada se debe al rendimiento de los colectores. Estos son plásticos, sin cobertura, lo cual los hace menos onerosos, pero con peor desempeño. De todas formas, al trabajar principalmente en verano con alta radiación y temperaturas ambiente, el rendimiento no se ve tan perjudicado y es comparable con el de colectores de otras tecnologías más complejas.

La Figura 13 muestra el rendimiento en función de la temperatura media del fluido, la temperatura ambiente y la irradiación solar. Se observa que para una temperatura dada de agua, a menor temperatura ambiente y a menor irradiación solar el rendimiento disminuye.

Si bien el rendimiento varía para cada condición climática, podemos estimar el rendimiento en condiciones normales. La temperatura media del agua que se está calentando es el promedio entre la temperatura de entrada, 18°C y la de salida, 40°, y resulta en 29°C. Para la temperatura ambiente podemos asumir un valor representativo de 20°C considerando que se tiene en cuenta únicamente la temporada cálida y durante los horarios de bombeo. Por último, se considera una irradiación de 750 W/m².

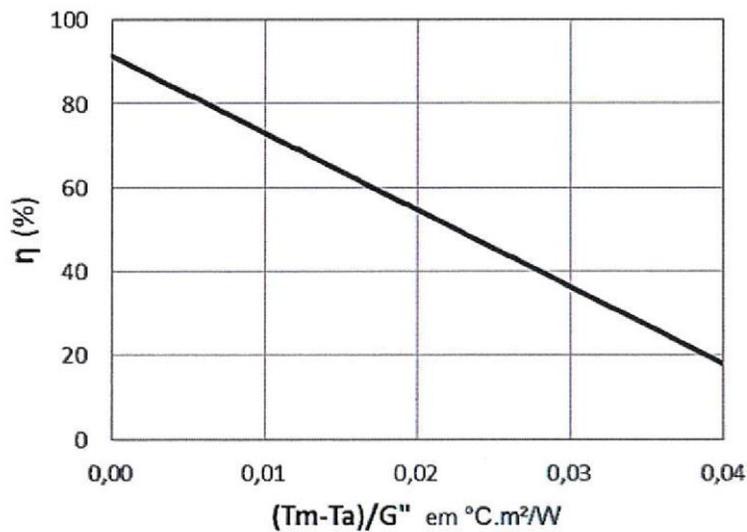


Figura 13: Rendimiento de los colectores.

Con los valores antes mencionados se obtiene un rendimiento de aproximadamente 70%, como valor representativo. Es necesario considerar, sin embargo, que este valor es algo aproximado, ya que por ejemplo las condiciones de viento afectarán de forma no despreciable, especialmente debido a que se trata de colectores sin cubierta (vidrio).

3.4.3 Energía extraída

A partir de las medidas de caudal y de la temperatura de salida del pozo caliente (pozo 3), calculamos la energía que fue extraída como:

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p(T - T_{ref}) \quad (\text{eq. 5})$$

Se considera como temperatura de referencia, la temperatura del acuífero antes de ser modificado, siendo 18°C, al igual que para la energía inyectada. Es decir, se considera la energía extraída por encima de la contenida por el agua sin modificar. La energía extraída en la segunda temporada resulta:

$$E_{e,temp 1} = 1,24E3 \text{ kWh}$$

Esto es un 15% aproximadamente de lo inyectado en la temporada 2. Este valor, si bien parece ser muy bajo, no es descabellado teniendo en cuenta el tamaño pequeño de esta instalación. Es necesario recalcar que el rendimiento de recuperación es mayor, a mayor tamaño de instalación, debido a que la relación área/volumen de la zona afectada térmicamente disminuye a medida

que el volumen afectado aumenta. Esta relación está íntimamente relacionada con la relación de pérdidas de energía / energía acumulada. Es de esperar entonces, que en el caso de una instalación de mayor porte, se obtengan rendimientos de recuperación mayores.

La Figura 14 muestra la evolución temporal de diferencia de temperaturas del flujo extraído, respecto de los 18°C asumidos como base. Se observa como en los primeros días se extrae agua con unos 4°C de temperatura por encima, mientras que al cabo del primer mes esta diferencia está en el entorno de los 2°C.

En la Figura 15, se observa la evolución de energía diaria extraída (kWh/día) por el sistema y la proporción sobre el total extraído. Se observa como en los primeros días se logran unos 25-30 kWh, con un caudal diario de extracción de 5,9 m³/día, mientras que al cabo del primer mes este valor se reduce a 15 y a 5 al final de los 4 meses.

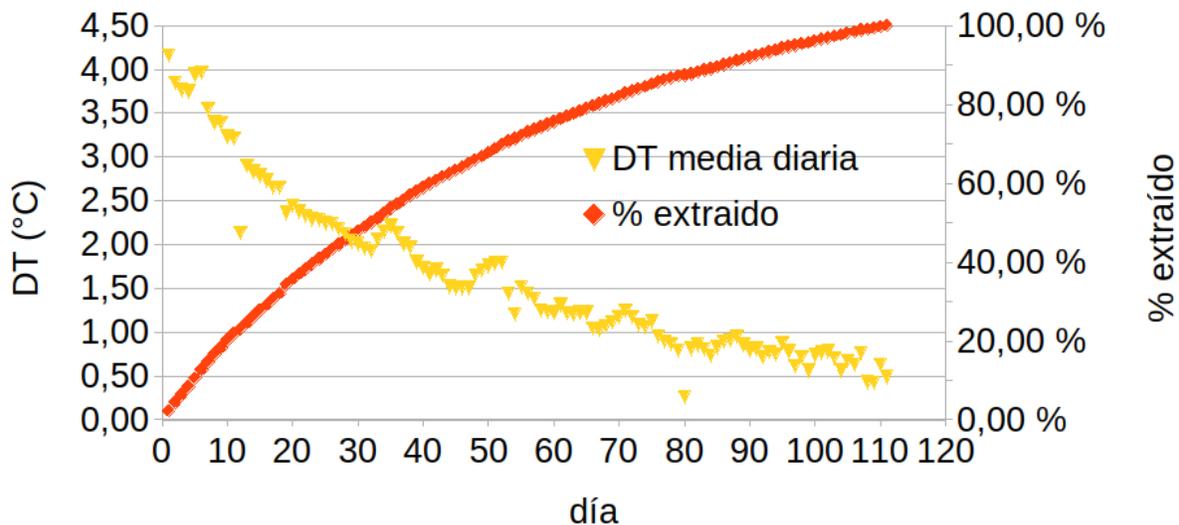


Figura 14: Evolución temporal de diferencia de temperaturas del flujo extraído, respecto de los 18°C asumidos como base.

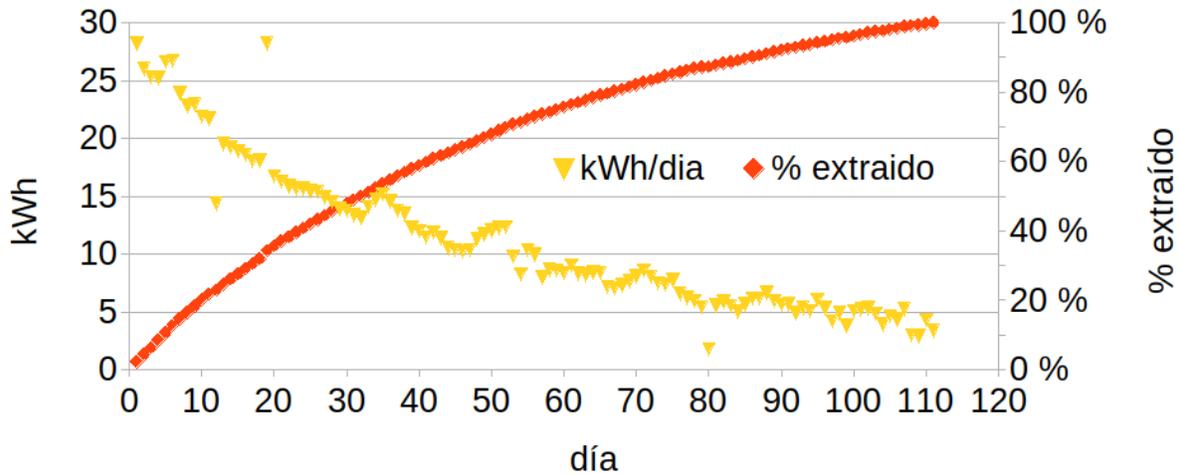


Figura 15: Evolución de energía diaria extraída (kWh/día) por el sistema y la proporción sobre el total extraído.

3.5 Variación de temperaturas en el acuífero

Los 5 pozos monitores más el pozo de inyección, con sus respectivos *divers* permiten monitorear la temperatura y altura de agua en cada instante. El sistema reporta datos cada 5 minutos con estos datos y otras variables: radiación, caudal, temperatura de entrada y salida a los colectores y, frecuencia de la bomba. Estos pozos tienen 25 m de profundidad, y el agua se encuentra al llegar a los 17 m y se mantiene hasta el final del pozo. Los *divers* son colocados a 22 m de profundidad, de forma de tomar las medidas en la zona media de la columna de agua disponible en el pozo.

La Tabla 2 muestra las temperaturas en los distintos pozos luego de la inyección de agua caliente en ambas temporadas. Estas temperaturas son las máximas, pero como promedio diario. Las temperaturas se ven afectadas por la inyección de agua caliente, especialmente del pozo 3, por ellos se toma la temperatura promedio en el día, y no la máxima temperatura alcanzada instantáneamente.

Tabla 2: Temperatura en los pozos luego de la segunda temporada de inyección.

ozo	Temp. inicial (°C)	Temp. media diaria final temporada 2 (°C)
1	18,0	22,8
2	18,0	26,8

3 (inyección)	18,0	33,5
4	18,0	27,7
5	18,0	28,2
6	18,0	23,8

Las variaciones de temperatura son significativas en todos los pozos. Los pozos más lejanos a la inyección perciben menores variaciones de temperatura. Si bien el pozo 5 está a mayor distancia de la inyección que el pozo 1, este último tiene la particularidad de que no tiene zona ranurada a la altura de inyección del agua, sino algunos metros más abajo, debido a que se trata de un pozo preexistente, lo cual hace que el agua inyectada no pueda atravesar el tubo del pozo e impactar directamente sobre la sonda de temperatura. El primero está aguas abajo del flujo natural del acuífero provocando que las variaciones en temperatura de este sean más acentuadas. Más allá de las consideraciones anteriores, permanecen dudas respecto a las causas para la gran diferencia encontrada en el aumento de temperaturas del pozo 1 respecto de los pozos 2 y 4.

Por otro lado, las variaciones de temperatura resultan más elevadas que las pronosticadas por el modelo analítico (Tabla 3) utilizado en primera instancia para dimensionar el sistema.

Tabla 3: Variación de temperatura esperada por el modelo analítico.

Pozo	Variación de temperatura esperada por el modelo analítico
1	2,5
2	1,0
4	1,0
5	7,5
6	5,3

El modelo analítico, así como las mediciones son realizadas en un único plano del acuífero, por lo que se realizaron mediciones que proporcionan información del comportamiento en la dimensión vertical. Se realizaron las mediciones manuales del perfil vertical de temperaturas de los pozos, tal como se detalla en la sección 4.1.4. Con una sonda se midieron las temperaturas cada 1m a lo alto de cada pozo (Figura 16). Sin considerar el pozo de inyección (T3), el perfil de temperaturas en cada pozo presenta un comportamiento similar, mostrando variaciones pequeñas y las temperaturas más bajas hacia el fondo, posiblemente por efectos de

estratificación. La temperatura 3 muestra variaciones más marcadas en la altura ya que recibe directamente el agua caliente, y según el tiempo que esté estacionada se verá modificada. Se verifica nuevamente en estas mediciones que los pozos 6 y 1 son los más fríos.

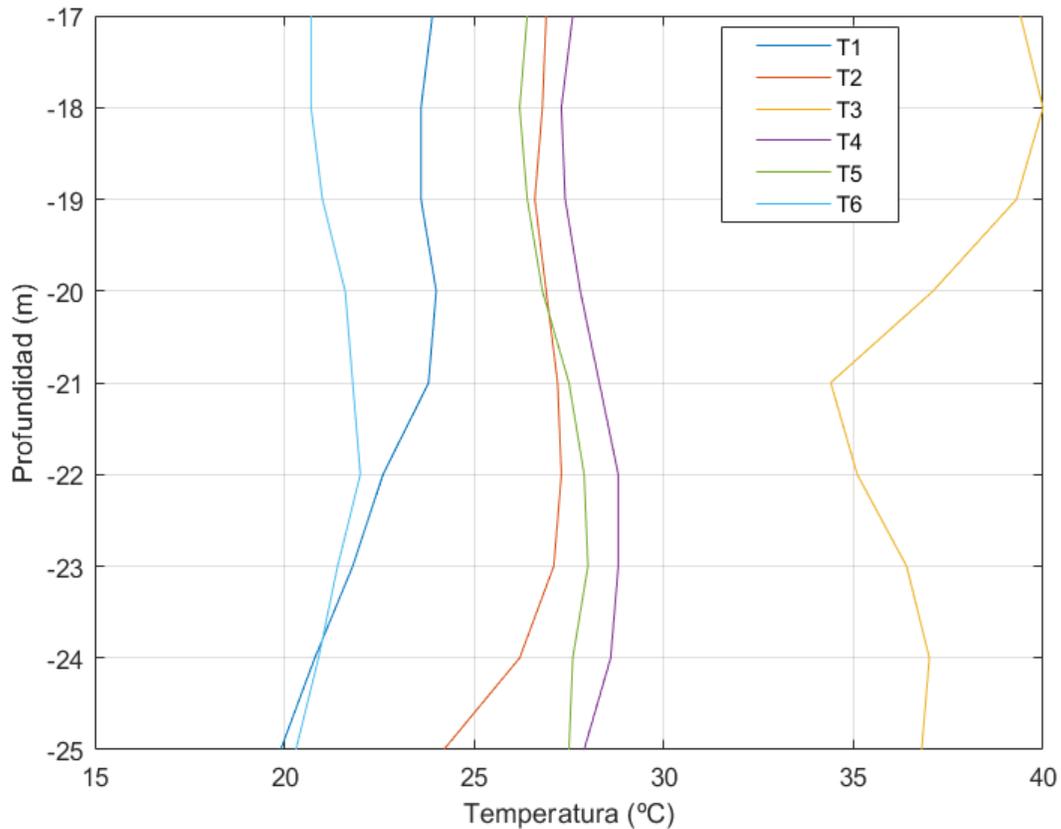


Figura 16: Perfil vertical de las temperaturas dentro de los pozos (24 enero de 2020).

En este tipo de mediciones se espera que se presenten variaciones según el comportamiento del sistema en las últimas horas.

4 Caracterización de subsuelo y del acuífero de la instalación experimental

Uno de los objetivos específicos del proyecto es la caracterización del subsuelo y del acuífero en el sitio de la instalación experimental. Para esto se realizaron una serie de ensayos de campo y laboratorio. A continuación, se detallan los distintos ensayos realizados, su metodología y los principales resultados.

4.1 Ensayos de campo

4.1.1 Tomografías de resistividad eléctrica

Con el objetivo de definir en detalle la geometría del acuífero se realizaron en total 3 tomografías de resistividad eléctrica en las inmediaciones del pozo de inyección y pozos monitores.

La prospección geoelectrónica de superficie permite el relevamiento del subsuelo de forma rápida y precisa, infiriendo los diferentes estratos geológicos y sus espesores. Indirectamente, puede asociarse a la geología relevada, la posible presencia de agua subterránea. Dentro de las metodologías empleadas se encuentra la tomografía eléctrica. La tomografía eléctrica construye una sección de resistividades en una longitud establecida, de acuerdo al número de electrodos utilizados y la separación entre ellos, obteniéndose en una línea las zonas de mejores posibilidades productivas.

La resistividad de las rocas está relacionada con la porosidad y contenido en agua, por lo que es un parámetro de gran utilidad para la determinación de la geometría de los acuíferos, y para la evaluación de la calidad de las aguas.

Considerando un cubo eléctricamente uniforme de lado L (Figura 17) en el que está pasando una corriente I , genera una reducción de potencial (V) entre ambas caras debido a la resistencia a la conductividad eléctrica. La resistencia R es proporcional al largo (L) del material resistivo e inversamente proporcional a la sección de pasaje (A). $R \propto L/A$

La anterior relación también puede ser escrita como: $R = \rho L/A$ donde la constante de proporcionalidad ρ es la resistividad "real". De acuerdo a la Ley de Ohm, la relación de la caída de potencial a la corriente aplicada (V/I) también define la resistencia (R) del cubo y ambas

ecuaciones pueden ser combinadas para definir el producto de la resistencia y la distancia (ohm.m). El inverso de la resistividad es la conductividad ($1/\rho$) que tiene unidades de (Siemens/m).

$$\rho = \frac{VA}{IL} \left(\frac{\Omega}{m} \right)$$

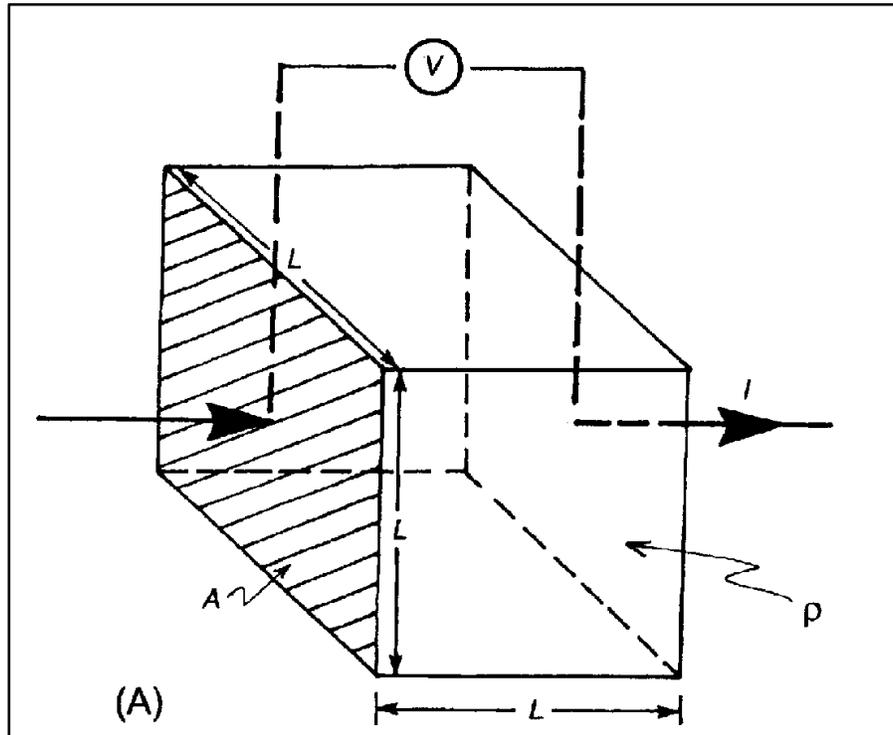


Figura 17: Definición de resistividad a través de un bloque homogéneo.

Para un electrodo único de corriente colocado en superficie en un medio homogéneo de resistividad ρ , las líneas de corriente se alejan radialmente. El voltaje decrece entre dos puntos y puede ser descrito como el gradiente de potencial δ , que es negativo debido a que decrece en la dirección del flujo de corriente. Las líneas equipotenciales de igual voltaje intersecta las líneas de igual corriente en ángulo recto (Figura 18). Si se agrega otro electrodo de corriente, se forma una nueva distribución de potencial (Figura 19) y la expresión de voltaje en cualquier punto es la suma de la contribución de voltaje de cada electrodo de corriente.

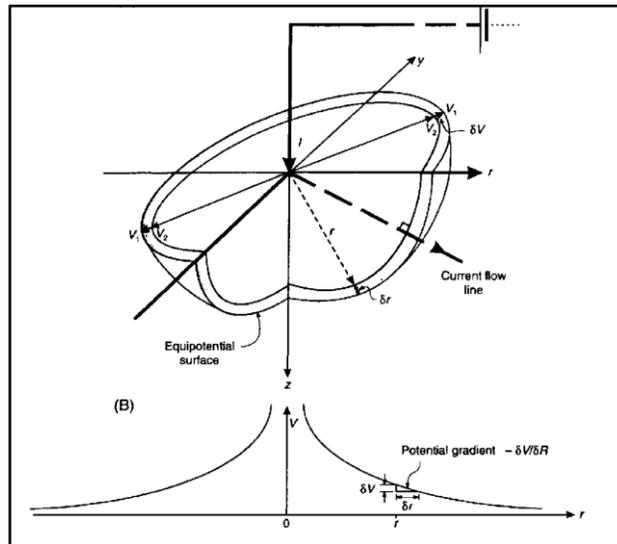


Figura 18: Líneas de corriente y superficie equipotencial para un electrodo único de corriente.

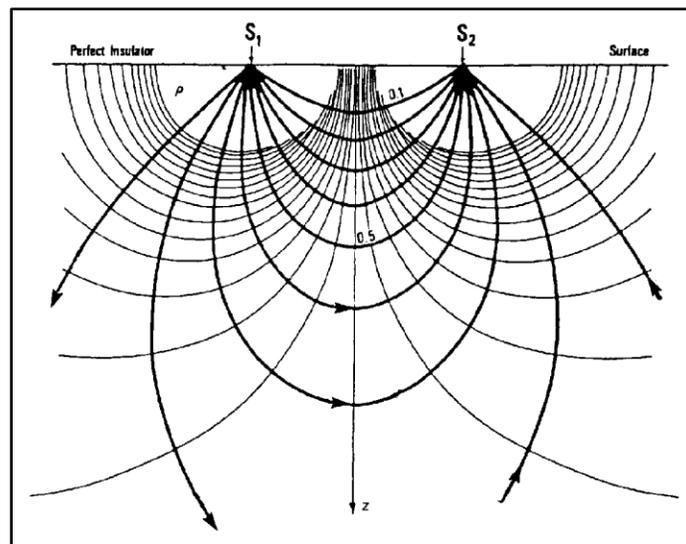


Figura 19: Líneas de corriente y superficie equipotencial para dos electrodos de corriente.

La forma general de distribución de electrodos en una medición de resistividad es la mostrada en la Figura 20.

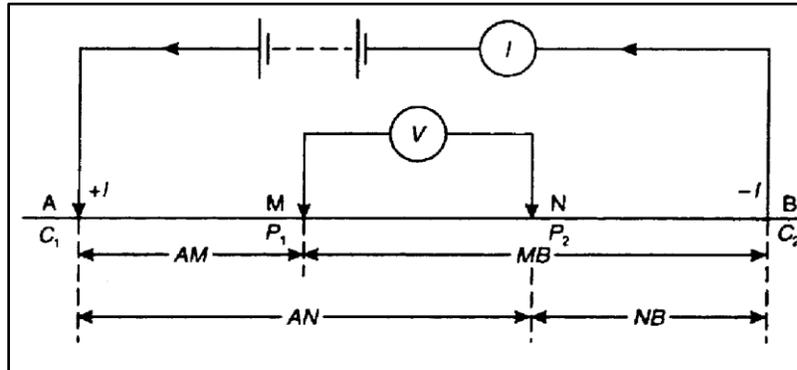


Figura 20: Distribución de electrodos para una medición de resistividad.

Los valores de potencial en los electrodos son:

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right) \text{ y } V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right)$$

El valor de resistividad es

$$\rho = \frac{2\pi \delta V_{MN}}{I} \left\{ \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right) \right\}$$

Existen diversas formas de explorar geoelectricamente el subsuelo, siendo las de mayor resolución las denominadas técnicas tomográficas. Es una técnica de carácter no destructivo, con bajo costo operativo, de fácil y rápida implementación. Se destaca respecto a otras técnicas geofísicas de prospección somera (Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), GeoRadar, etc) dado que permite obtener información en detalle en dos y tres dimensiones a dichas profundidades.

La TRE 2D es un método geofísico que permite investigar la variación de la resistividad del subsuelo a profundidad y lateralmente (Zuñiga (2011)). Permite obtener buenos resultados en áreas con geología o anomalías moderadamente complejas, debido a su mayor amplitud en cuanto a información relevada.

La técnica consiste en medir la resistividad aparente (RA) del subsuelo mediante un dispositivo tetraelectrónico determinado y con una separación constante entre electrodos. El conmutador permite ir variando las distancias entre los pares de electrodos emisor-receptor por múltiplos de un valor denominado "n", en dependencia del arreglo geométrico seleccionado, de forma tal que el resultado final será una sección de RA a varios niveles "n" de profundidad. Tales mediciones se efectúan comúnmente usando un número variable de electrodos, dependiendo de la profundidad a la que se quiera explorar el subsuelo, conectados a un cable multinúcleo. Una

microcomputadora portátil junto con un conmutador electrónico se usa para seleccionar automáticamente los cuatro electrodos correspondientes a cada medida.

En la Figura 21 se muestran los elementos necesarios para realizar una medición de TRE en campo.

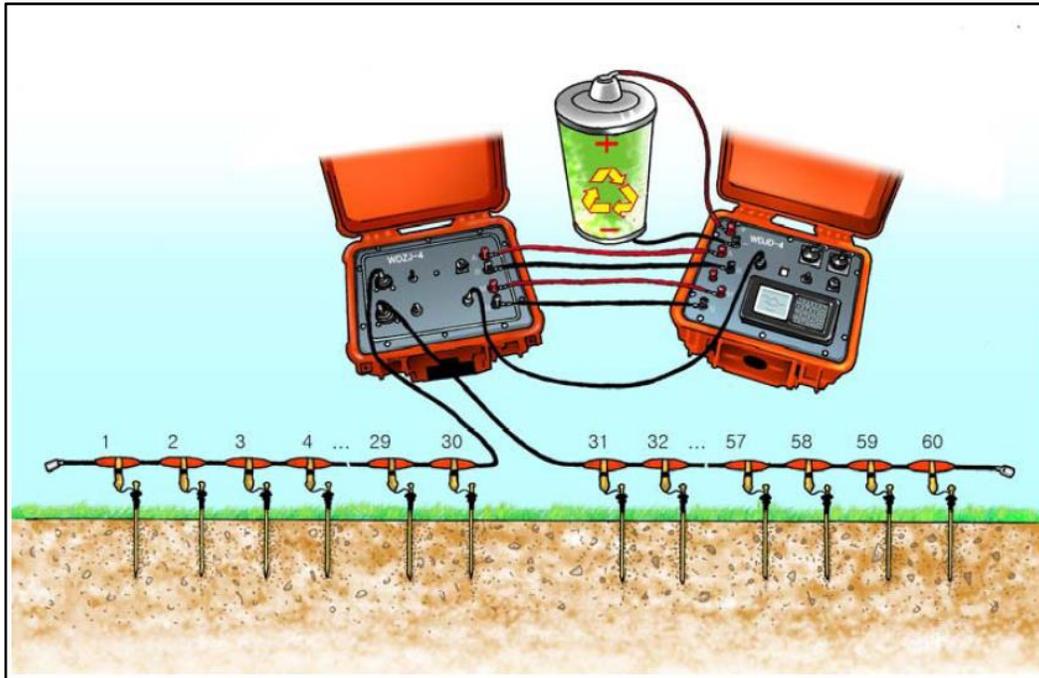


Figura 21: Método tomografía geoelectrica. Manual Usuario WDJ-4 BTKS.

Un arreglo electrodico es una disposición geométrica formada por dos pares de electrodos, dos emisores y dos receptores. A través de los electrodos emisores C1-C2 se inyecta corriente continua al terreno midiendo su intensidad con un miliamperímetro en serie. Simultáneamente, se mide la diferencia de potencial entre los electrodos P1-P2 con un milivoltímetro. Los datos son almacenados en la unidad central.

Los arreglos geométricos más utilizados son: Dipolo-dipolo, polo-dipolo, polo-polo, Schlumberger y Wenner. A continuación se muestra un esquema básico de las variantes Wenner, Schlumberger y Dipolo Dipolo (Figura 22).

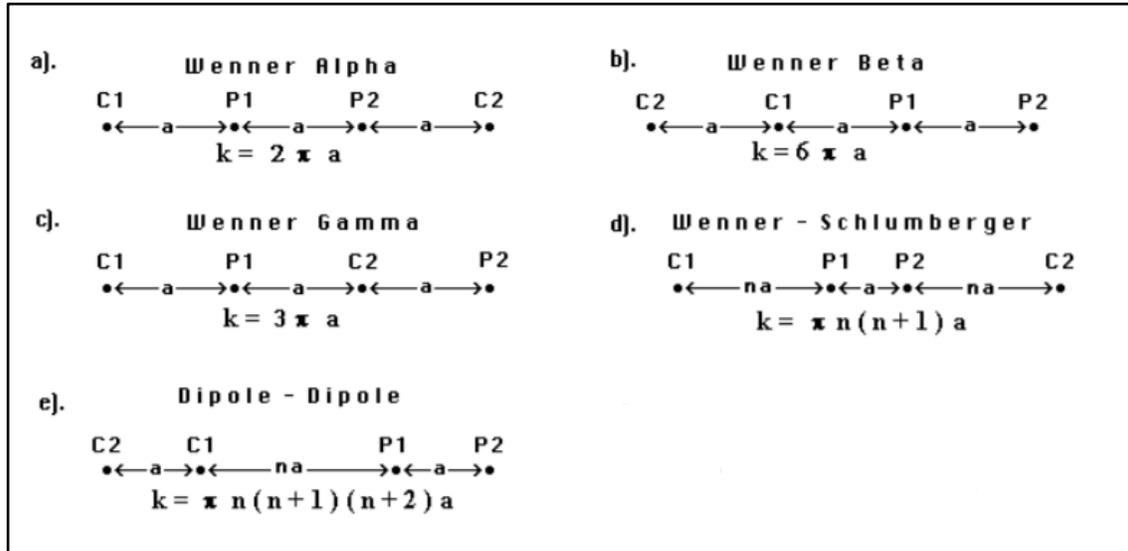


Figura 22: a) Wenner Alpha; b) Wenner Beta; c) Wenner Gamma; d) Wenner Schlumberger e) Dipolo-Dipolo. Loke (2004).

En la Figura 23 se muestra la disposición de los puntos medidos en profundidad utilizando un arreglo Wenner, y los puntos de medición que se generan. Otro tipo de arreglo variará la geometría del plano de resistividades obtenido.

A modo general, a medida que aumenta la separación entre los electrodos, se obtienen nuevos puntos de medición a mayores profundidades y se van conformando las capas $n=1$, $n=2$, etc.

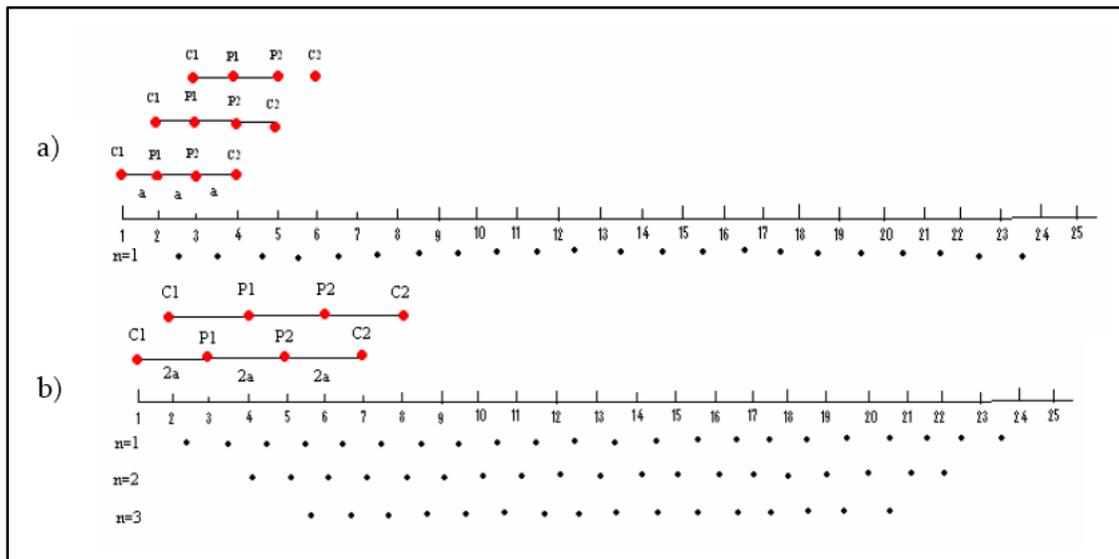


Figura 23: Arreglo Wenner Alpha en tomografía geoelectrica. Manual Usuario WJD-4 BTKS.

Los datos son tratados por medio de algoritmos matemáticos de inversión. La inversión da como resultado una imagen en 2D de resistividades aparentes (Figura 24) que se correlaciona con la

información geológica, perforaciones, geoquímica, hidrogeología y edafología conocidas. A través de la interpretación se llega a las conclusiones del Diagnóstico Ambiental, que puede ser constatada mediante cateo mecánico.

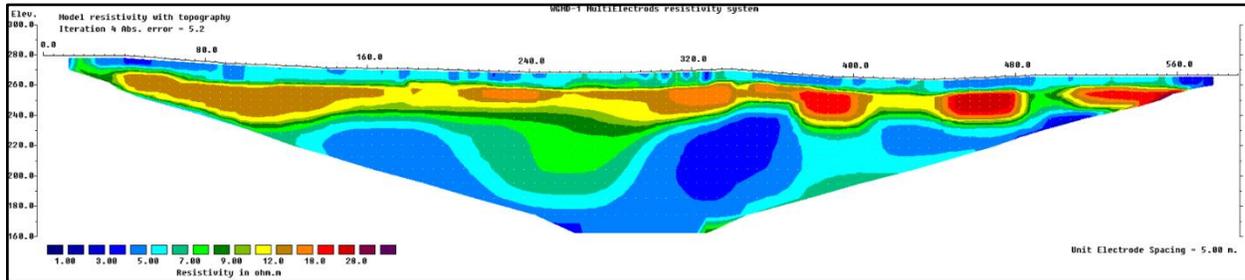


Figura 24: Imagen invertida de una tomografía geoelectrica (GHS, IMFIA, 2015)

Según Orellana (1972), los materiales presentan las siguientes resistividades (Tabla 4).

Tabla 4: Resistividades de diferentes materiales. (modificada de Orellana 1972).

Material	Resistividad (ohm.m)	
	Mínimo	Máximo
Arena	100	1000
Limo	20	100
Arcilla	1	100
Agua dulce	10	300

Astier (1975) hacen hincapié en que estos valores pueden variar según el grado de humedad y arcillosidad que presenten. Reynolds (1997) establece que la arena arcillosa presenta valores entre 30 y 215 oh.m

Según los materiales existentes en la Fm. Libertad, con predominancia de limos arcillosos y loess, los valores de resistividad se deberían encontrar en el entorno de 1 a 100 ohm.m aunque puede presentar variaciones según el grado de humedad y contenido de arcilla que presenten.

La Fm. Raigón con arenas gruesas con intercalaciones arcillosas, presentaría valores de 30-215 ohm.m según Reynolds (1997).

Los arreglos electródicos empleados en este proyecto (Wenner alpha, beta, gamma y dipolo-dipolo), son de los arreglos más empleados para determinaciones de resistividad según López et al. (2018). Sin embargo, según este autor, la elección del arreglo a emplear dependerá del objetivo perseguido o de las características de la investigación. Como puede ser la profundidad

de investigación, la sensibilidad del arreglo a los cambios verticales y horizontales de la resistividad subterránea y la cobertura horizontal de datos.

El arreglo Dipolo-Dipolo, a diferencia del arreglo Wenner, tiene resolución suficiente para detectar estructuras verticales, pero no así para estructuras horizontales como pueden ser las capas sedimentarias. La profundidad de investigación es menor al arreglo Wenner. Otra desventaja del arreglo es la atenuación de la señal al aumentar el factor “n”. Por lo tanto, para este proyecto se emplea un factor máximo de “n” igual a 6 como recomienda Geotomo Software (2009).

4.1.1.1 Resultados

La Figura 25 muestra la ubicación de las TRE junto al pozo de inyección y los pozos monitores.

Las mediciones se llevaron a cabo mediante el equipo GD-10 Geomative, realizándose 3 secciones, con distintos métodos de colecta de datos (o arreglos). La separación entre electrodos fue de 3 metros, alcanzando los 135 metros de apertura para las tres tomografías. Los arreglos utilizados fueron Wenner Alpha, Wenner Beta, Wenner Gamma y Wenner Schlumberger.

Las Figura 26 a Figura 37 presentan los resultados finales de las tomografías para los arreglos practicados. Junto al perfil tomográfico se presenta el perfil litológico del pozo. Puede apreciarse la congruencia entre los rangos de resistividades medios y cada formación geológica (Fm. Libertad o Fm. Raigón)



Figura 25: Ubicación de tomografías.

4.1.1.1.1 Tomografía 1

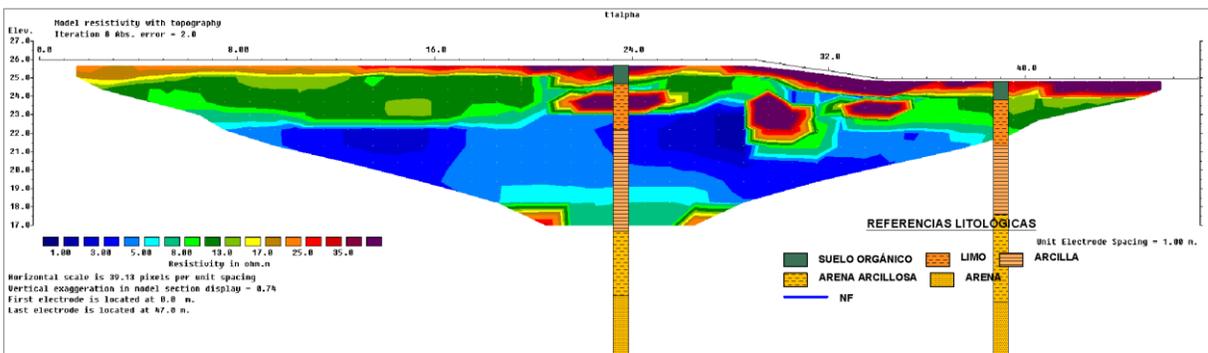


Figura 26: Procesamiento de los datos correspondientes a la Tomografía 1 utilizando un arreglo Wenner Alpha.

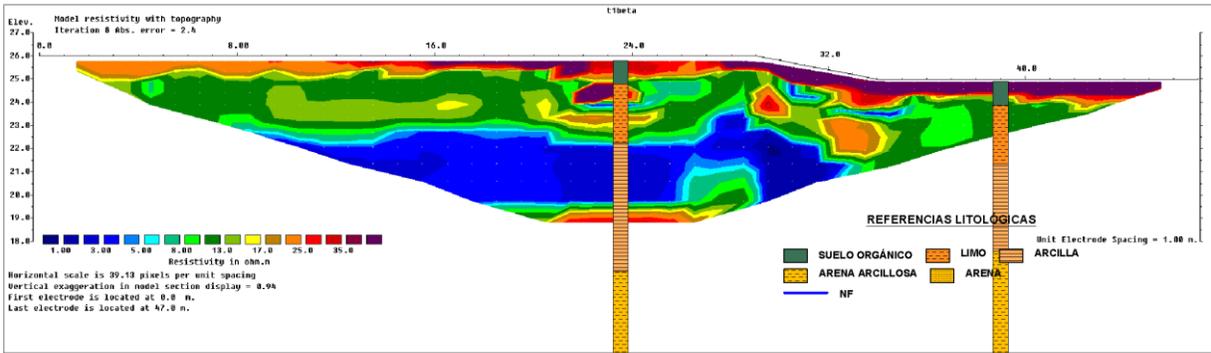


Figura 27: Procesamiento de los datos correspondientes a la Tomografía 1 utilizando un arreglo Wenner Beta.

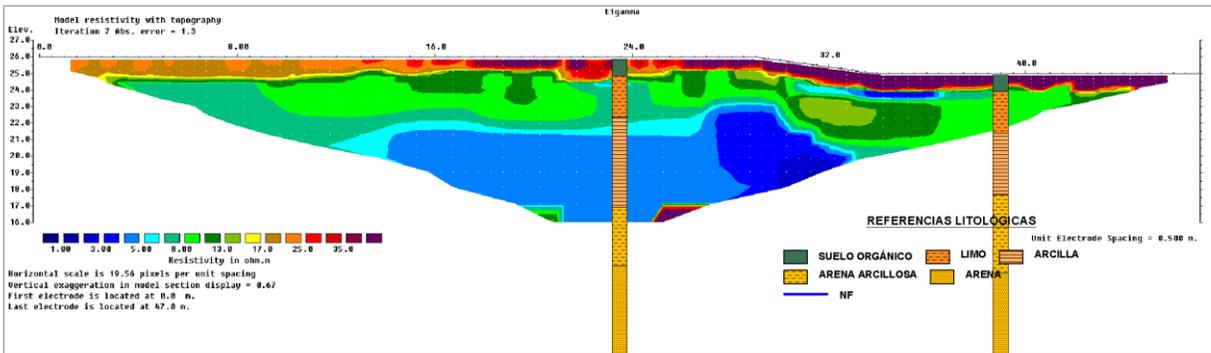


Figura 28: Procesamiento de los datos correspondientes a la Tomografía 1 utilizando un arreglo Wenner Gamma.

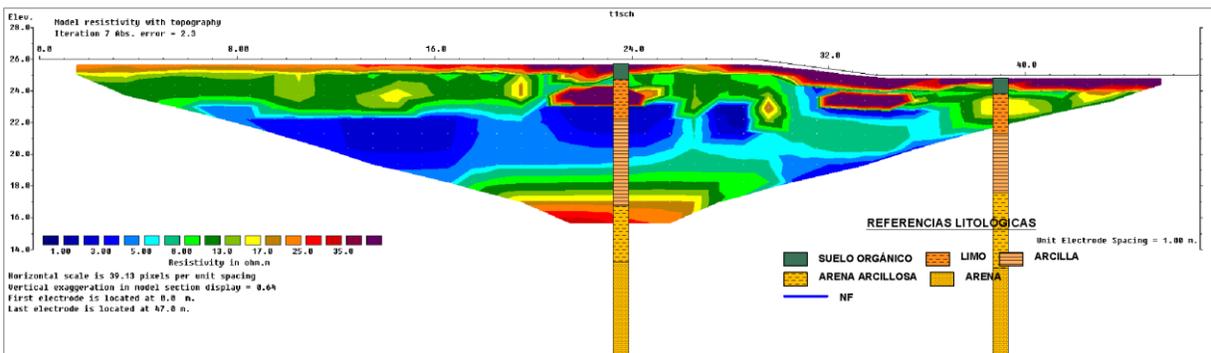


Figura 29: Procesamiento de los datos correspondientes a la Tomografía 1 utilizando un arreglo Wenner Schlumberger.

4.1.1.1.2 Tomografía 2

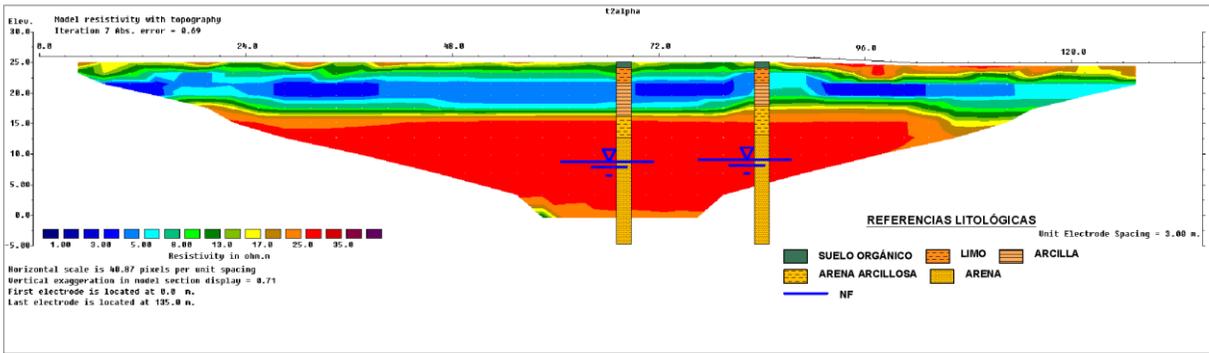


Figura 30: Procesamiento de los datos correspondientes a la Tomografía 2 utilizando un arreglo Wenner Alpha.

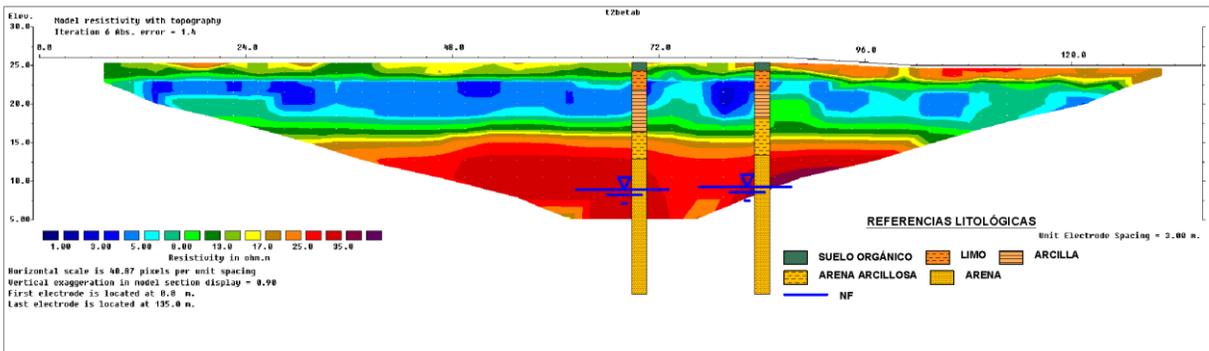


Figura 31: Procesamiento de los datos correspondientes a la Tomografía 2 utilizando un arreglo Wenner Beta.

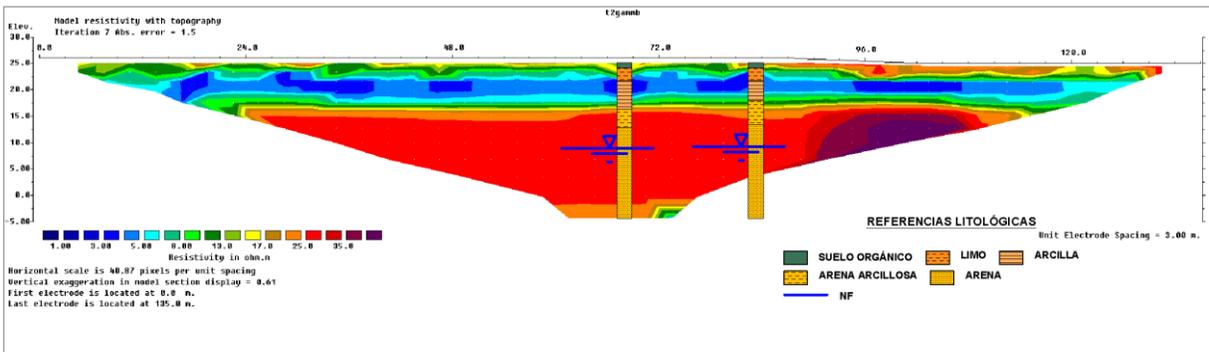


Figura 32: Procesamiento de los datos correspondientes a la Tomografía 2 utilizando un arreglo Wenner Gamma.

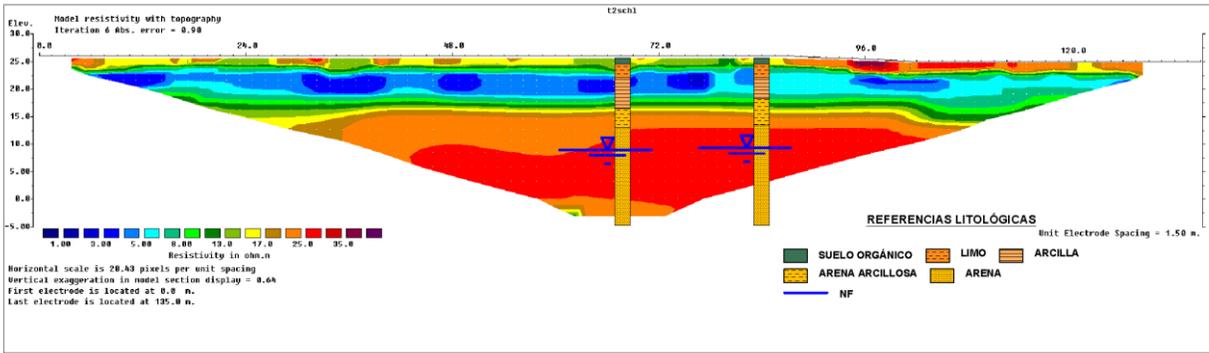


Figura 33: Procesamiento de los datos correspondientes a la Tomografía 2 utilizando un arreglo Wenner Schlumberger.

4.1.1.1.3 Tomografía 3

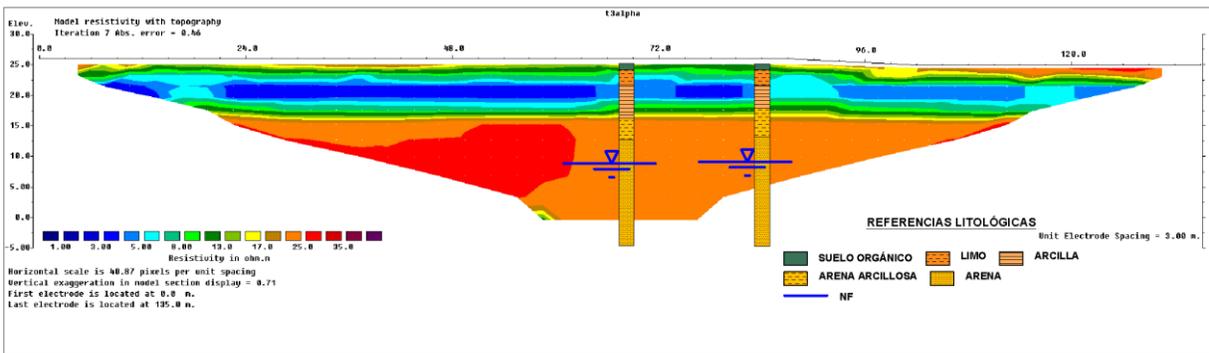


Figura 34: Procesamiento de los datos correspondientes a la Tomografía 3 utilizando un arreglo Wenner Alpha.

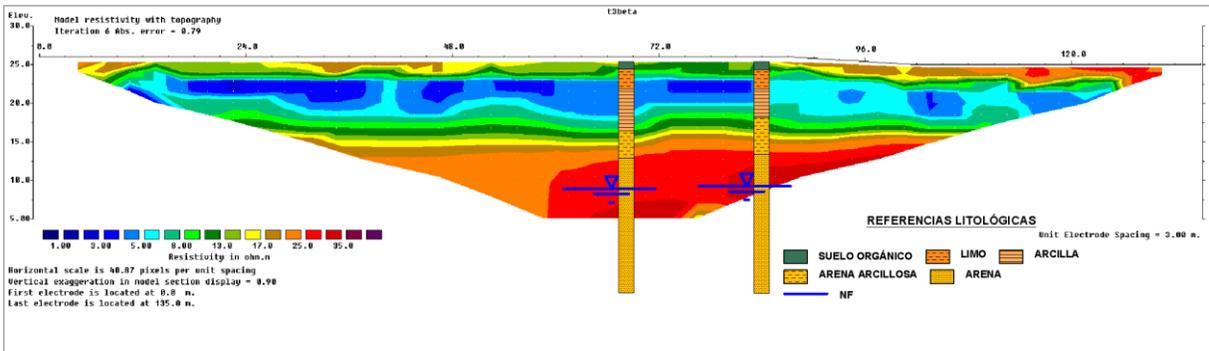


Figura 35: Procesamiento de los datos correspondientes a la Tomografía 3 utilizando un arreglo Wenner Beta.

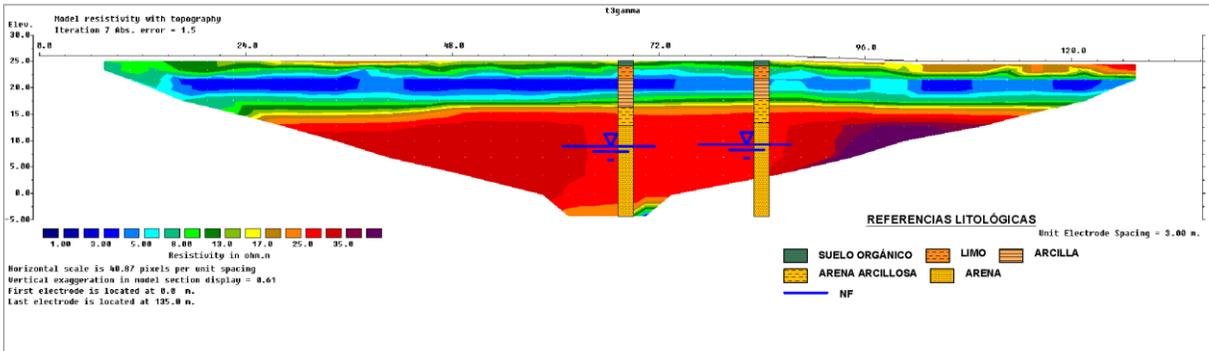


Figura 36: Procesamiento de los datos correspondientes a la Tomografía 3 utilizando un arreglo Wenner Gamma.

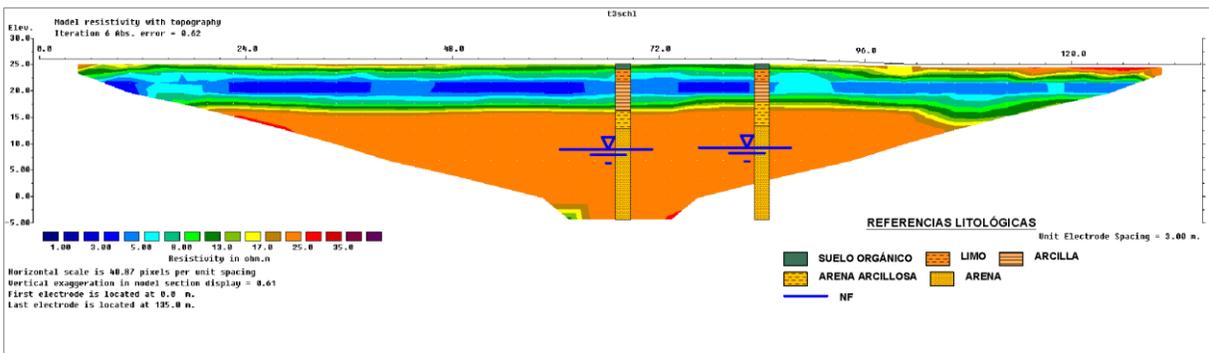


Figura 37: Procesamiento de los datos correspondientes a la Tomografía 3 utilizando un arreglo Wenner Schlumberger.

4.1.2 Piezometría

Para el correcto diseño de la instalación experimental es necesario conocer la dirección de flujo en el sitio donde se proyectaba construir el pozo de inyección y los pozos monitores.

Para esto, se realizó un relevamiento piezométrico en detalle en las inmediaciones de la escuela de Colonia Wilson. En enero de 2018 se llevó a cabo una campaña de medición de niveles estáticos, con el correspondiente georreferenciamiento con GPS diferencial de cada sitio relevado. En total se relevaron un total de 21 pozos. La Figura 38 muestra la grilla y los puntos relevados.

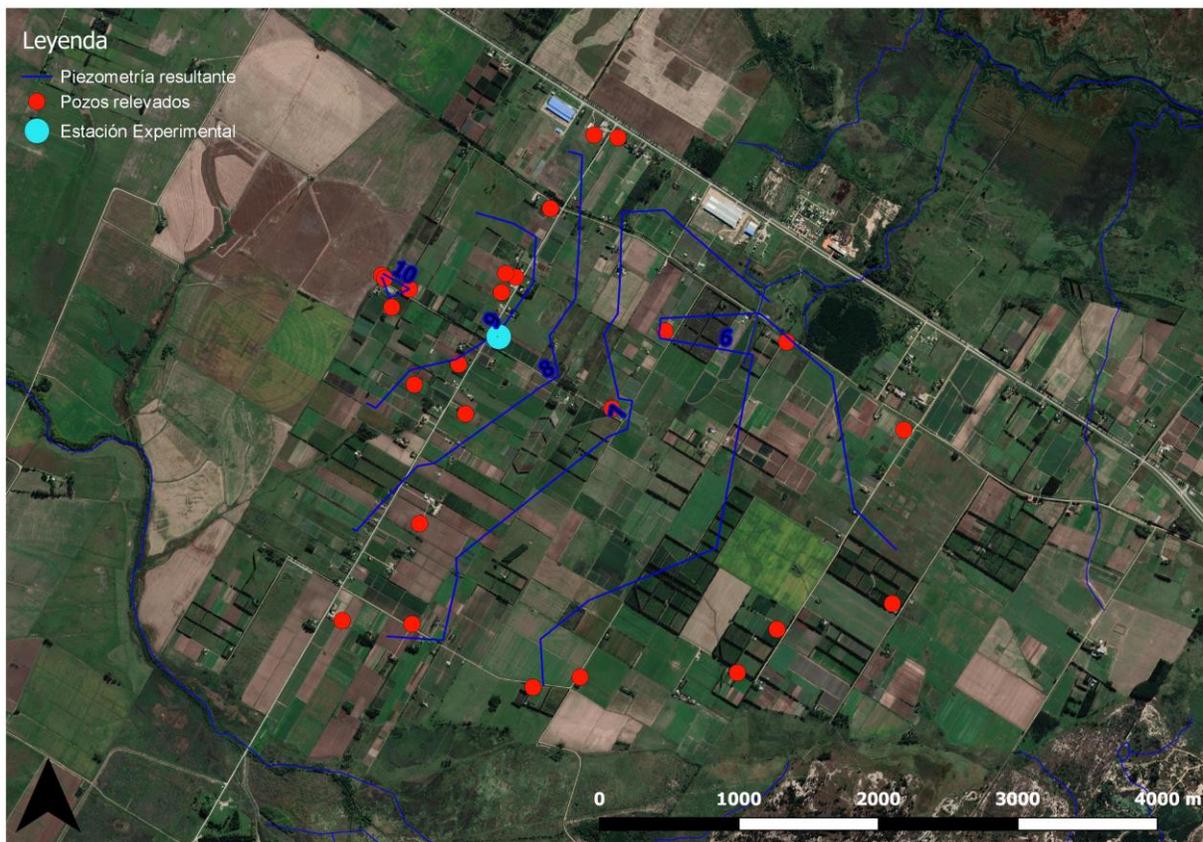


Figura 38: Piezometría resultante y perforaciones relevadas en la campaña de medición de niveles. Enero de 2018.

En base a la piezometría relevada se identificó la dirección de flujo en el sitio de la instalación experimental. La Figura 39 muestra la dirección de flujo y la ubicación final del pozo de inyección y pozos monitores.



Figura 39: Dirección de flujo y ubicación de pozos.

4.1.3 Ensayo de bombeo

Con el objetivo de estimar los parámetros hidráulicos del acuífero en la zona del proyecto, se realizó un ensayo de bombeo y recuperación. Durante la prueba, se registró la evolución de los niveles en el propio pozo y en piezómetros cercanos. Los registros de niveles se realizaron de forma manual y automática (divers). La Figura 40 muestra la evolución de niveles en uno de los piezómetros. El registro se realizó de manera continua mediante un diver. El caudal de bombeo durante la prueba fue de $4.3 \text{ m}^3/\text{s}$.

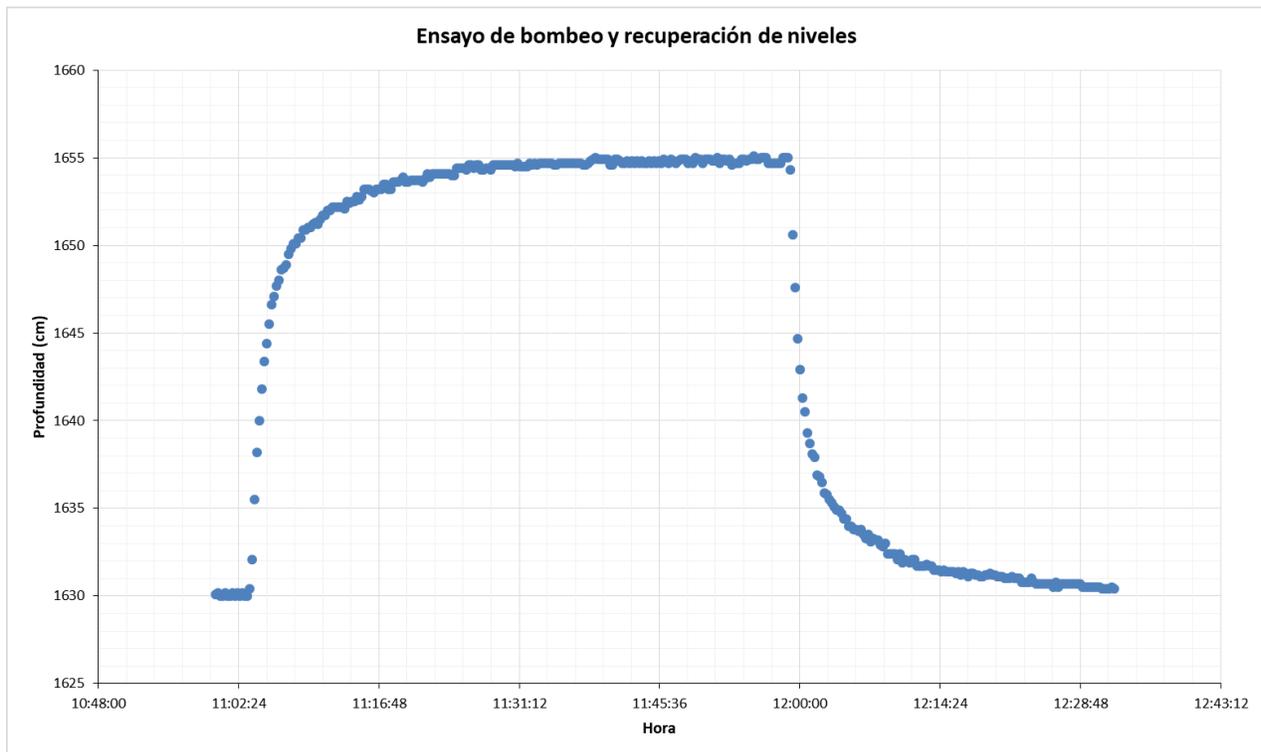


Figura 40: Evolución de niveles durante el ensayo de bombeo y recuperación. Datos relevados en uno de los piezómetros.

Para el cálculo de los parámetros hidrogeológicos se utilizaron los datos de bombeo y recuperación, obteniéndose datos coherentes para ambos casos.

Los parámetros hidráulicos del acuífero estimados a partir del análisis de la prueba de bombeo, discretizados según la información por piezómetro, se presenta en la Tabla 5.

Los valores de transmisividad obtenidos por ambos ensayos son muy similares. En cuanto al coeficiente de almacenamiento, si bien existen diferencias en función del punto de observación, los resultados son en ambos casos característicos de un acuífero cautivo.

Tabla 5: Transmisividad (T) y coeficiente de almacenamiento (S) estimados según prueba de bombeo y recuperación.

Punto de observación	Tipo de prueba	T (m ² /d)	S
Piezómetro 2	Bombeo	195	5.8E-05
Piezómetro 3	Bombeo	190	1.2E-04
Piezómetro 2	Recuperación	200	SD

4.1.4 Medición del perfil vertical de temperatura

El sistema de monitoreo de temperaturas instalado en los pozos solo permite la medición de temperatura a una profundidad determinada dentro del pozo.

Como forma de relevar la variación de temperaturas en la vertical, se realizaron mediciones manuales del perfil vertical de temperaturas de los pozos durante el último período de inyección. Con una sonda se midieron las temperaturas cada 1 m a lo largo del todo el perfil en cada pozo. El relevamiento de temperaturas se realizó en 16 de octubre de 2019 (previo a la segunda temporada de inyección), 24 de enero de 2020 (durante la segunda temporada de inyección) y 11 junio de 2020 (finalizada la segunda temporada de inyección, previo a la segunda temporada de extracción).

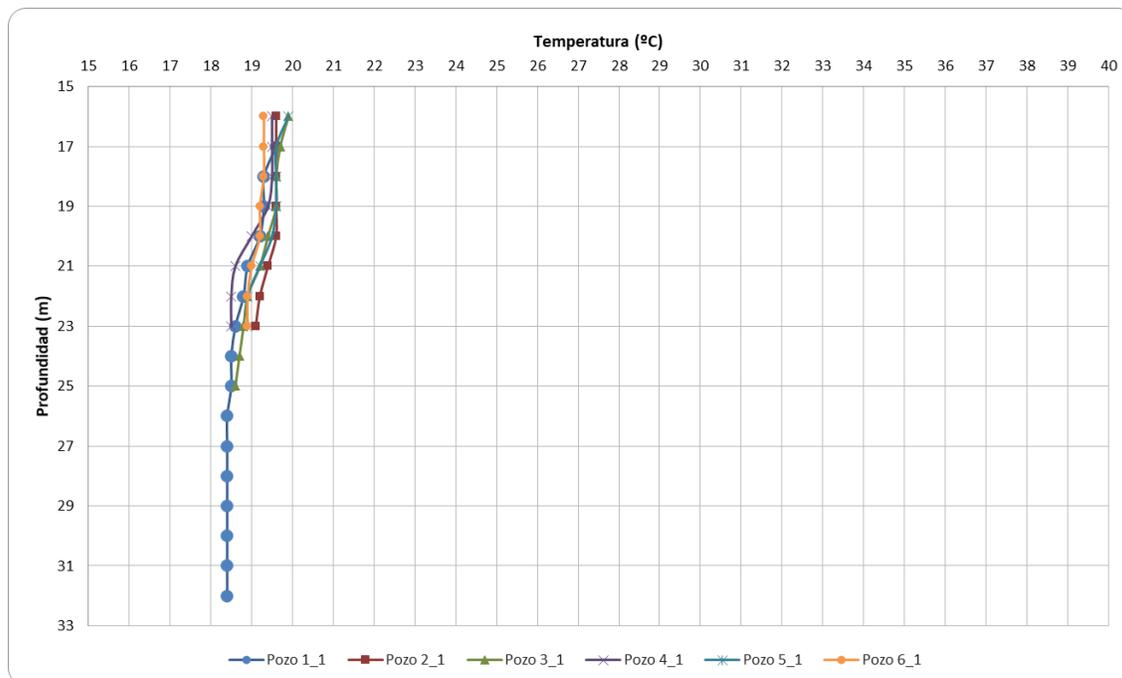


Figura 41: Perfil de temperatura – Octubre 2019.

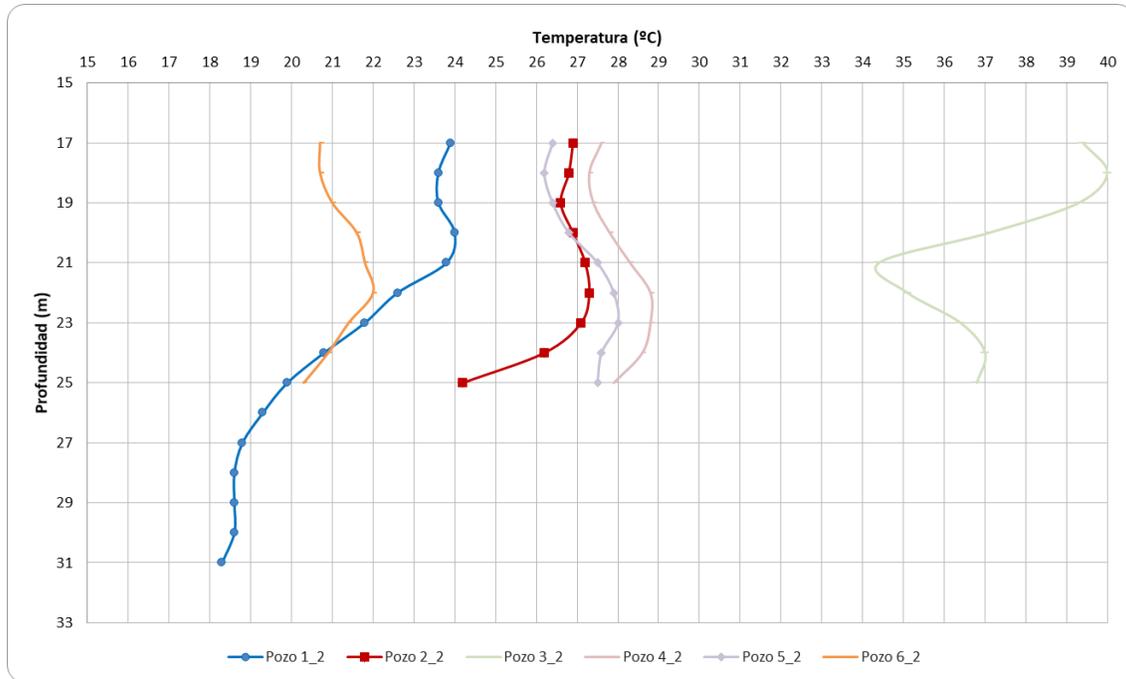


Figura 42: Perfil de temperatura – Enero 2020.

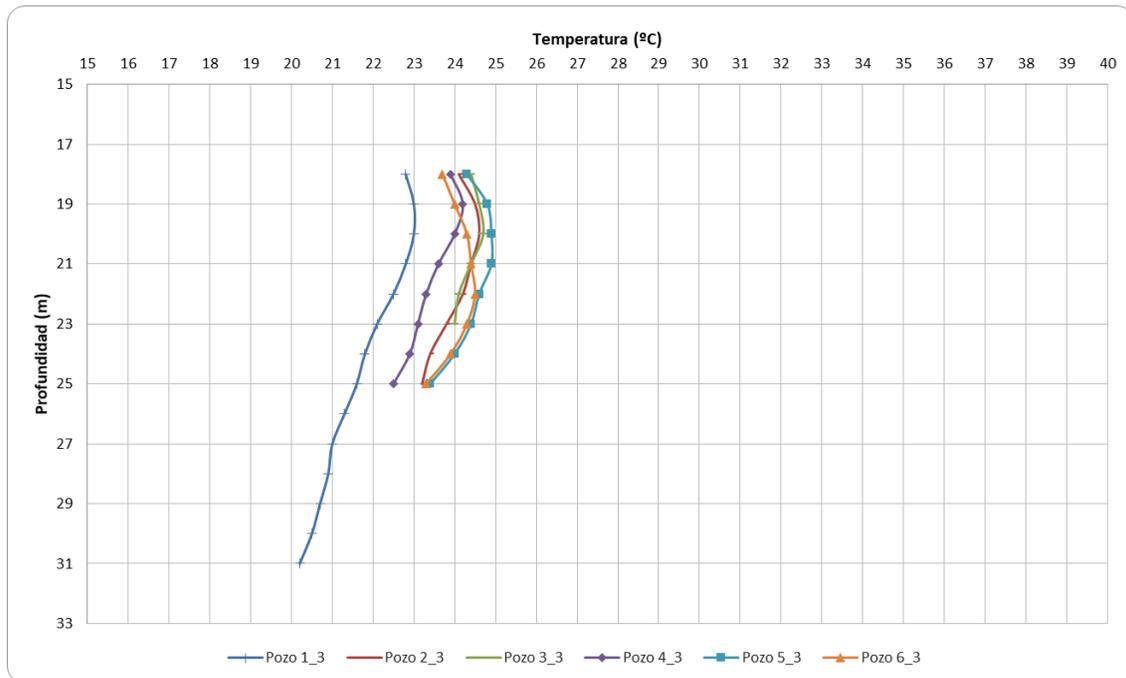


Figura 43: Perfil de temperatura – Julio 2020.

Se observa cómo varían las temperaturas coherentemente con la etapa de ensayo correspondiente (inicio, media, final de inyección). Asimismo, tal como se observó en las mediciones puntuales de temperatura, en general hay una afectación mayor para los pozos más

cercanos, con alguna diferencia en el pozo 1. Además se observa una distribución vertical de las temperaturas que no es del todo uniforme, siendo la profundidad más afectada la correspondiente a la zona de inyección (21 m).

Por otra parte, se observa que luego de unos meses de finalizada la inyección, los perfiles se hacen más parecidos entre sí, lo cual indica una gran variación de las temperaturas de las zonas más calientes (cercanas a la inyección). Incluso se observa que el pozo más alejado (pozo 6) no es el más frío en esta etapa.

En estas gráficas se observa además que el mapa global de temperaturas no es claramente bidimensional, sino que presenta zonas con gran variación vertical de temperaturas. Algunos efectos que se anticipan están actuando en esto, son las pérdidas de calor en el sentido vertical, especialmente hacia zonas más profundas, así como una posible estratificación de temperaturas en la zona saturada (observable luego de un tiempo de finalizada la etapa de inyección). Además, efectos de heterogeneidades en el acuífero (variación de conductividad hidráulica en la vertical), también pueden estar afectando.

Más allá de los comentarios anteriores, es necesario ahondar en el análisis de los resultados experimentales, por ejemplo mediante la comparación con resultados de simulaciones.

4.2 Ensayos de laboratorio

Además de los ensayos de campo, se realizó una serie de ensayos de laboratorio para determinar diversos parámetros de interés, tanto de la morfología y composición del subsuelo (mineralogía, granulometría, porosidad), como su efecto en la conductividad hidráulica, y también las propiedades termofísicas relevantes (conductividad térmica, capacidad térmica).

4.2.1 Ensayos de granulometría, mineralogía, porosidad, densidad y conductividad hidráulica

4.2.1.1 Análisis de suelos

Se realizaron ensayos para determinar las propiedades del subsuelo que inciden en la transferencia de calor.

Se estudiaron 18 muestras obtenidas a partir de una perforación de captación de agua de 26 metros de profundidad. Estas muestras pertenecen a 18 metros dentro de la misma (8 a 26 m), siendo el número de cada una correspondiente al intervalo de profundidad dentro del pozo.

Las distribuciones granulométricas de los especímenes se observa el predominio de sedimentos tamaño arena muy gruesa a gruesa, con variaciones en el porcentaje de gravas y limo-arcillas en los diferentes intervalos analizados (Figura 44). Es posible diferenciar y separar dos “grupos” granulométricos. El primero, integrado por dos muestras, correspondiente a la profundidad de 18 a 20 metros, donde el porcentaje de limo + arcilla es mayor (28 y 32%, muestras 18 y 19m respectivamente).

El otro grupo incluye al resto de las profundidades estudiadas. Con la particularidad de estar constituidas por arenas gruesas a muy gruesa como fracción dominante. En donde el porcentaje de gravas varía entre 6,3 a 24% (muestras 17m y 23m respectivamente), mientras que el porcentaje de limos-arcilla no supera el 2% (muestra 17m).

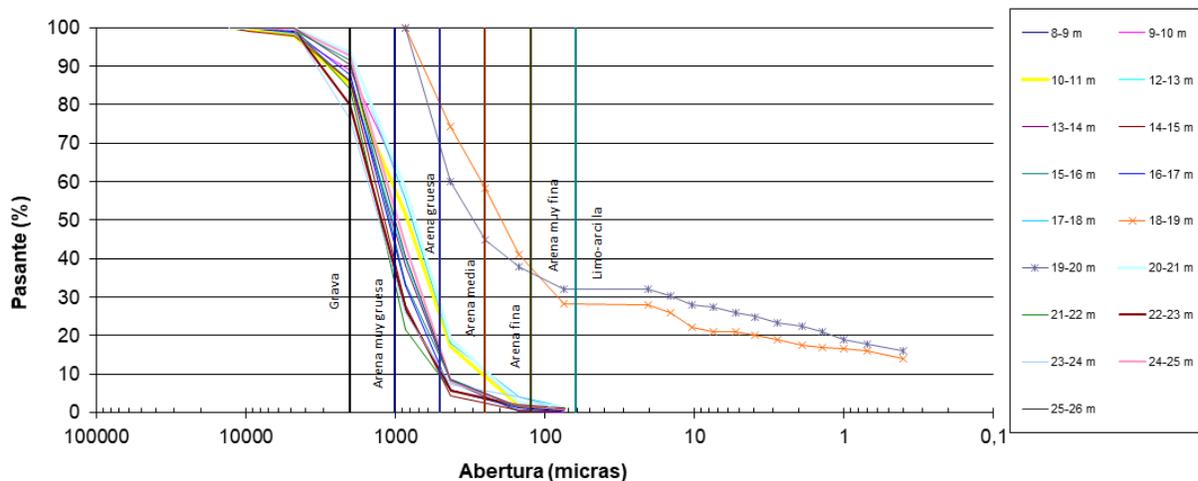


Figura 44: Curvas granulométricas de las muestras analizadas.

4.2.1.2 Propiedades físicas¹

Se obtuvieron dos valores de densidad diferentes, densidad mínima y máxima. (Figura 45 y Figura 46). Las densidades mínimas se encuentran comprendidas entre 1,57 y 1,74 g/cm³

¹ En la sección siguiente de determinación de conductividad térmica, se vuelven a determinar los valores de porosidad y densidad media, con la diferencia de que se realiza para muestras compuestas por sedimento y agua. En esta sección esto se realiza para las muestras de sedimento con poros de aire (sin agua).

(muestras 17-18 y 23-24 respectivamente), lo cual corresponde a una variación de 10% aproximadamente.

Las densidades máximas están en el rango de 1,75 a 1,94 g/cm³ (muestras 17-18 y 23-24 respectivamente), representando 10% de variación.

Los valores de índice de vacíos (e) se relacionan con las densidades, encontrando que los $e_{máx}$, varían entre 0,52 y 0,69 (muestras 23m y 17m respectivamente). Mientras que los valores de $e_{mín}$ se encuentran entre 0,35 y 0,51 (muestras 10m y 17m respectivamente).

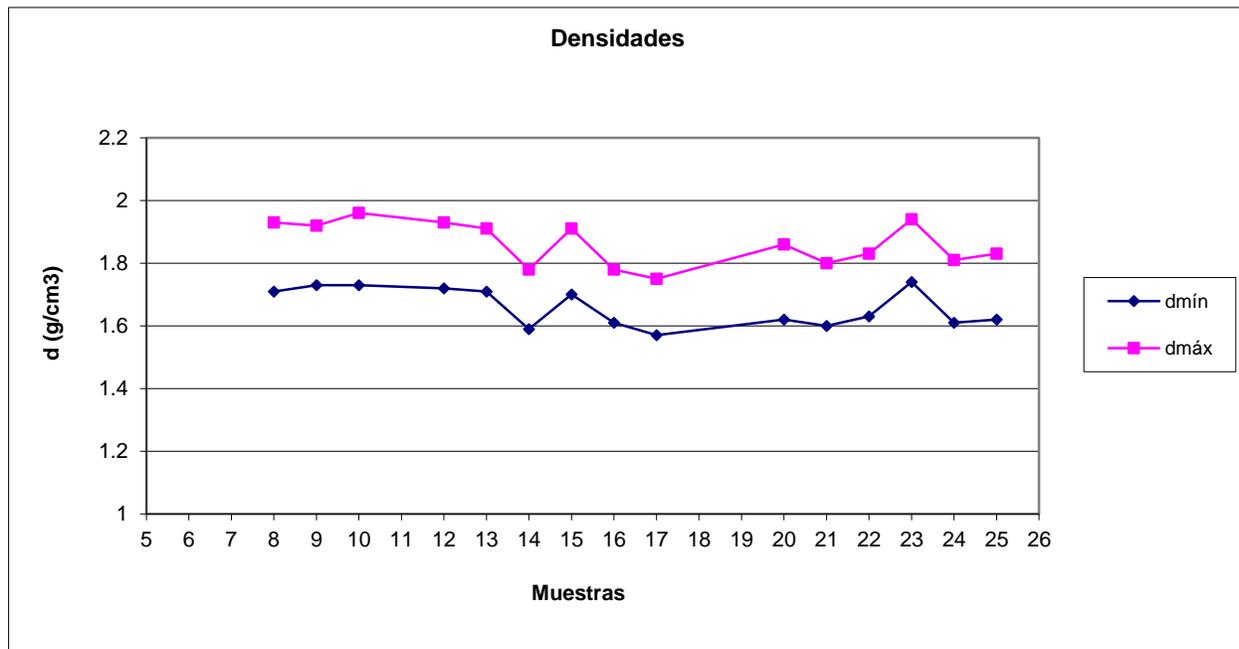


Figura 45: Valores de densidades de las muestras analizadas.

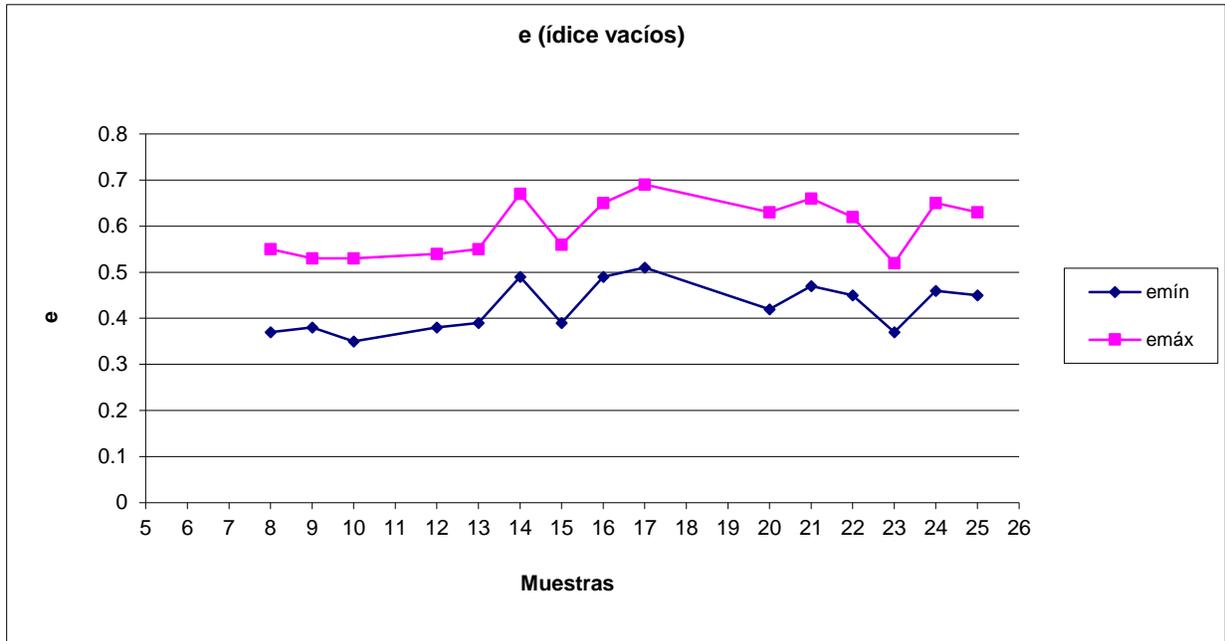


Figura 46: Valores de índices de vacíos máximos y mínimos.

Los datos de porosidad (Figura 47) obtenidos corresponden al estado suelto y compacto. En el primer caso, los valores mínimos y máximos representan una variación del 6% aproximadamente, 34,6% el menor (muestra 9m) y 40,7% el mayor (muestra 17m). En el estado compacto, la variación de valores de los extremos corresponde a casi el 8%. El mínimo, 25,9% (muestra 10m), y el máximo 33,8% (muestra 17m).

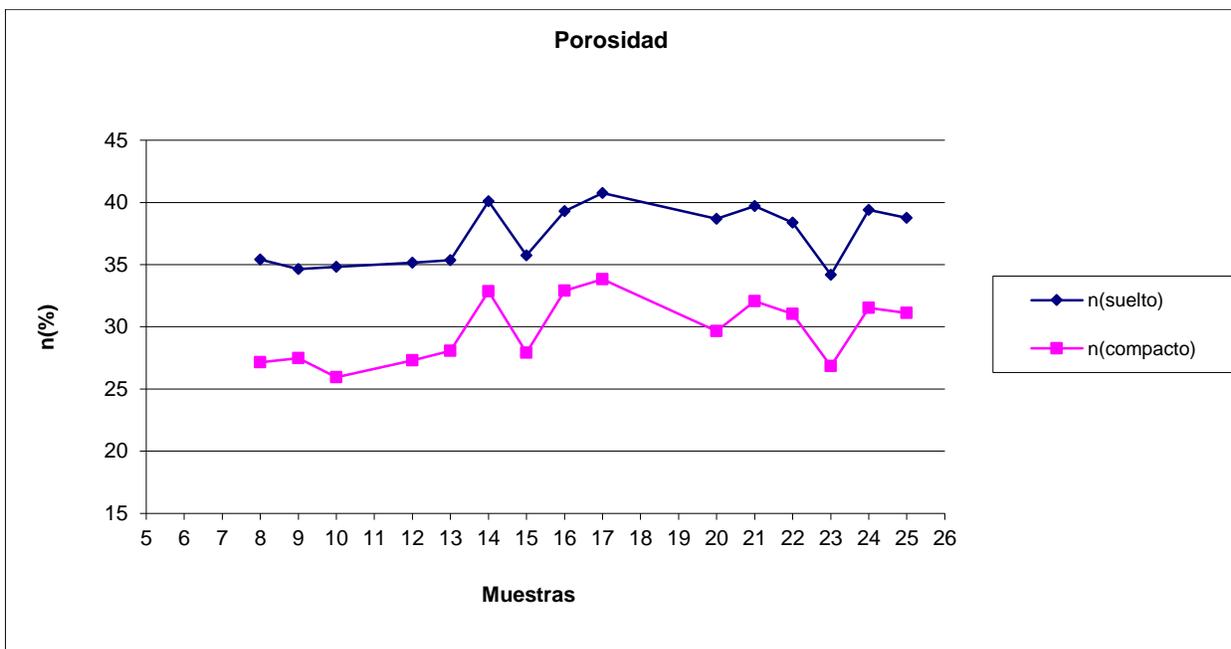


Figura 47: Porosidades de las muestras estudiadas.

4.2.1.3 Conductividad hidráulica (K)

Los datos de conductividad hidráulica fueron obtenidos mediante ensayos de laboratorio, en su estado suelto y compacto. Estos valores se encuentran relacionados a la distribución granulométrica de las muestras y a los parámetros mencionados anteriormente, en el estado suelto se corresponde con la densidad menor, índice de vacíos y porosidad mayor, por lo tanto se espera una conductividad hidráulica mayor. Mientras que en el estado compacto, la densidad es mayor, índice de vacíos y porosidad menor, esperándose una conductividad hidráulica menor.

Se estudiaron 5 muestras (Figura 48) del perfil del pozo (muestras 14m; 16m; 17m; 21m; 23m), considerando las similitudes entre todos los especímenes. Las mismas se realizaron según el criterio de porosidades determinadas, obteniéndose los siguientes valores de conductividad hidráulica (Tabla 6, Figura 49 y Figura 50).

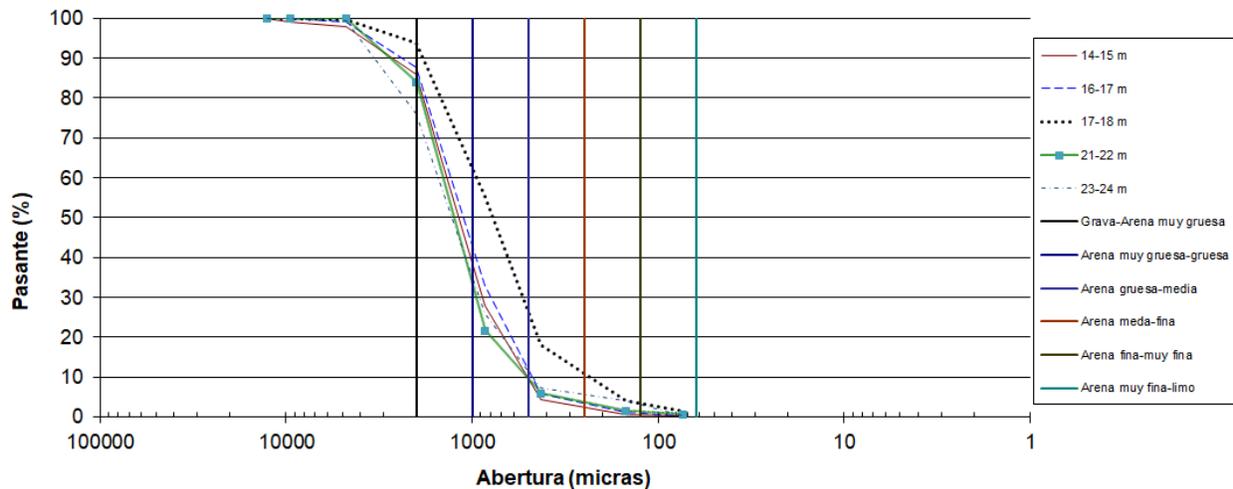


Figura 48: Distribución granulométrica de las muestras cuya conductividad hidráulica fue determinada.

Tabla 6: Valores de conductividad hidráulica (K) en el estado suelto y compacto.

Muestra	Porosidad suelta (%)	K suelto (m/s)	Porosidad densa (%)	K compacto (m/s)
14m	40,1	$3,2 \times 10^{-4}$	32,8	$1,3 \times 10^{-5}$
16m	39,3	$3,0 \times 10^{-4}$	32,9	$9,4 \times 10^{-6}$
17m	40,8	$7,3 \times 10^{-5}$	33,8	$2,0 \times 10^{-6}$
21m	39,7	$3,3 \times 10^{-4}$	32,1	$1,6 \times 10^{-5}$

23m	34,2	$2,4 \times 10^{-4}$	26,8	$1,3 \times 10^{-5}$
-----	------	----------------------	------	----------------------

Los valores de K en el estado suelto son del orden de magnitud de 10^{-4} m/s para todos los valores estudiados, menos para la muestra 17-18 el cual es de 10^{-5} m/s. La diferencia entre los valores corresponde a 22%. Al densificar la muestra disminuye un valor de 10 veces la K .

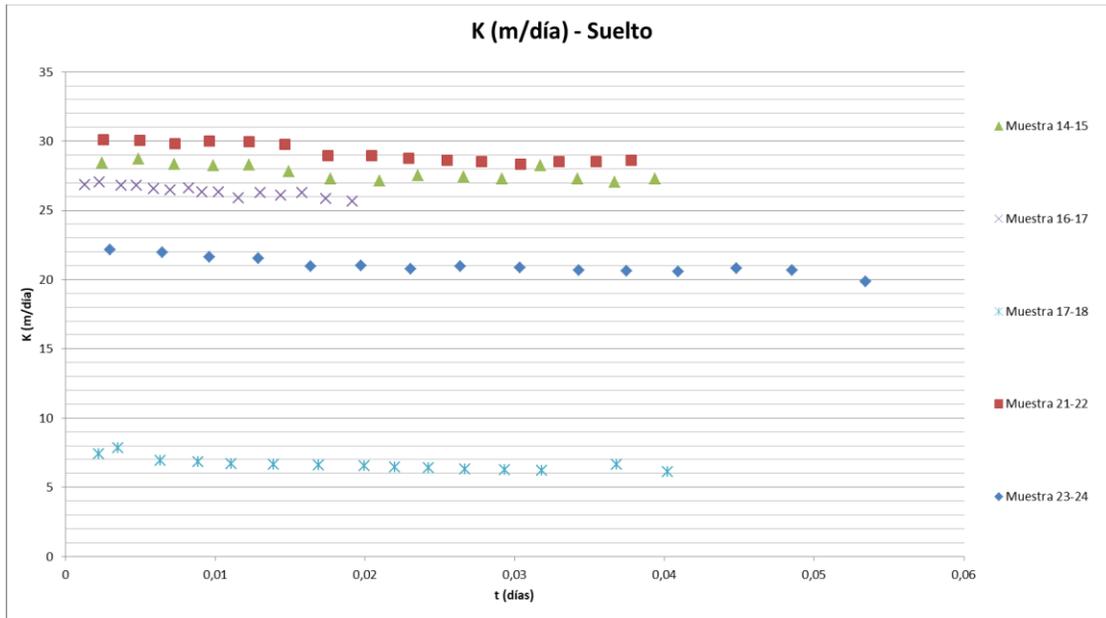


Figura 49: Conductividad hidráulica en estado menos denso.

En el estado más denso, con la disminución en la porosidad, los valores de conductividad hidráulica disminuyen en un orden de magnitud (Figura 50).

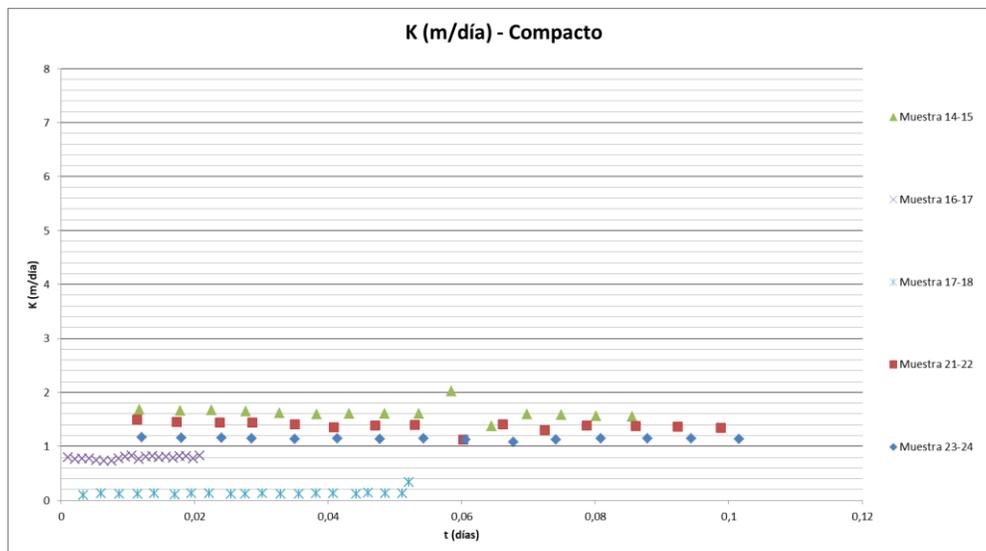


Figura 50: Conductividad hidráulica en el estado más denso.

4.2.1.4 Mineralogía

Los resultados del estudio mineralógico se presentan a continuación en la Tabla 7, descripción macroscópica.

Tabla 7: Minerales identificados en la caracterización macroscópica de las muestras.

Muestras/ Minerales	8	9	10	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
	Porcentajes (%)																
Qz	78-85	73-81	75-83	75-82	75-82	83-89	84-90	83-90	81-87	79-85	83-88	78-84	71-79	68-78	75-80	75-82	68-75
Pg	15-22	20-27	17-25	18-25	18-25	11-17	10-16	10-17	12-18	15-21	12-17	15-22	21-29	22-32	20-25	18-25	25-32
Fd	1	1	1	<1	1	<1	<1	1	1	1	1	1	3	3	3	<1	3
Líticos	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Máficos	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Epidoto	-	-	-	<1	<1	<1	<1	<1	<1	-	-	-	-	-	-	-	-

Qz: Cuarzo; Pg plagioclasa; Fd feldespato potásico, Líticos (2 o más minerales en un grano), máficos y epidoto minerales resistentes identificados pero poco significativos.

4.2.1.5 Conclusiones

Los resultados de las muestras estudiadas indican que corresponden a arena muy gruesa a gruesa, con porcentajes de fracción de limo y arcilla que no supera el 2 %, salvo para las muestras 18 y 19 donde el mismo alcanza los 28 y 32% respectivamente. La composición es de cuarzo y feldespatos (plagioclasas y feldespato potásico).

Los valores de densidad obtenidos se encuentran entre 1,57 y 1,94 g/cm³ (densidad mínima y máxima respectivamente), lo cual corresponde a una variación de 19 % entre los dos valores.

Los $e_{máx}$ varían entre 0,52 y 0,69 (17% de variación). Mientras que los valores de $e_{mín}$ se encuentran entre 0,35 y 0,51 (16% de variación).

Las porosidades obtenidas están comprendidas entre 26% (estado compacto) y 41 % (estado suelto), lo cual implica una variación de 15 % entre estos estados.

Los valores de conductividad hidráulica de las muestras (excepto los niveles 18 a 20 m) se encuentran comprendidos en el orden de magnitud de 10⁻⁴ m/s en el estado menos denso y 10⁻⁵ m/s en el estado compacto.

4.2.2 Ensayo de conductividad térmica y determinación de capacidad térmica y porosidad (sedimento-agua)

Para evaluar la conductividad de un sólido granular se utiliza un aparato experimental, en el cual se coloca una muestra de suelo, a través del cual se le hace pasar una cantidad de calor predeterminada, midiendo las diferencias de temperatura obtenida entre caras opuestas, y así determinar la conductividad térmica, en estado estacionario.

A continuación se detalla el procedimiento de diseño del dispositivo de ensayo, para luego realizar una evaluación con un modelo numérico de la transferencia de calor, y finalmente una descripción del montaje experimental y los resultados obtenidos.

4.2.2.1 Modelado simplificado y diseño del sistema

4.2.2.1.1 Configuración axial (tentativa inicial)

Inicialmente se consideró un diseño del dispositivo de medición en el que la conducción se diera de forma unidimensional, en coordenadas cartesianas. Esto es, en un cilindro, se conduce calor entre las dos bases del mismo, mientras que la cara lateral está aislada (Figura 51).

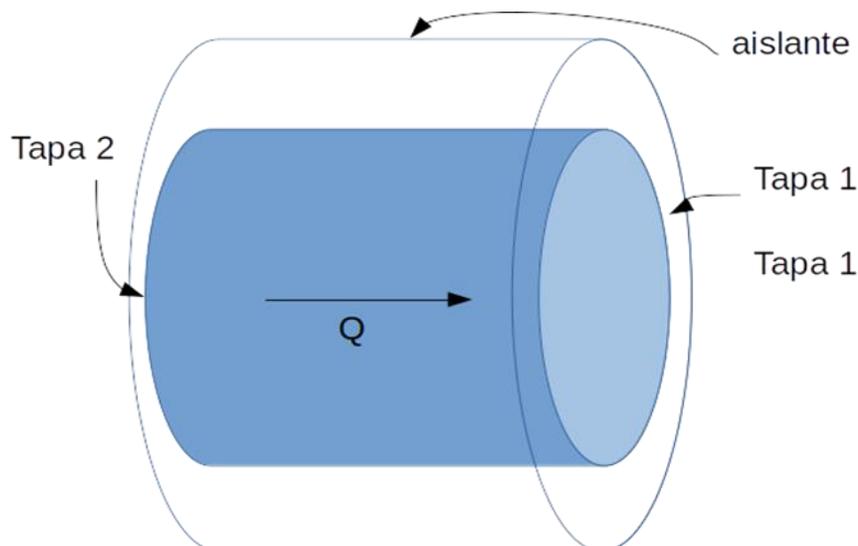


Figura 51: Geometría tentativa inicial para la configuración experimental.

De esta forma, conociendo el calor impuesto sobre una de las caras (Q), imponiendo la temperatura sobre la cara opuesta (T_2), y midiendo las temperaturas resultantes sobre estas (T_1 y T_2), se puede deducir la conductividad utilizando la fórmula siguiente:

$$k = L \frac{Q}{A (T_1 - T_2)} \quad (\text{eq.})$$

Donde L es la distancia entre las caras opuestas 1 y 2 y A es el área transversal al pasaje del calor, o sea el área de las superficies 1 y 2. En el espacio entre ambas caras se colocaría el material del cual se precisa calcular su conductividad, en este caso la mezcla de agua y sedimentos que conforman el acuífero.

Ahora bien, para esto es necesario que el calor “perdido” por las caras laterales sea lo suficientemente bajo como para ser despreciado, lo cual se lograría únicamente si se asegura una alta resistencia al pasaje del calor a través de ellas (resistencia transversal).

Una primera aproximación para el cálculo de este calor puede realizarse considerando que el flujo de calor a través de la cara lateral (Q_{trans}) es unidimensional (en sentido radial) y se da entre un valor medio de temperatura en el interior entre T_1 y T_2 , y la temperatura ambiente (T_{amb}):

$$Q_{trans} = k_{aisl} 2 \pi L \frac{(0.5 T_1 + 0.5 T_2 - T_{amb})}{\ln(1 + 2e_{aisl}/d)}$$

Donde k_{aisl} y e_{aisl} son la conductividad térmica y espesor del aislante colocado en las caras laterales y d es el diámetro del cilindro.

De esta forma, se puede analizar la relación entre Q_{trans} y Q , la cual debería permanecer muy baja.

$$\begin{aligned} \frac{Q_{trans}}{Q} &= \frac{k_{aisl} 2 \pi L^2}{k \ln(1 + 2e_{aisl}/d) \pi d^2 / 4} \frac{(0.5 T_1 + 0.5 T_2 - T_{amb})}{(T_1 - T_2)} \\ &= 4 \frac{k_{aisl}}{k} \left(\frac{L}{d}\right)^2 \frac{(T_1 + T_2 - 2 T_{amb})}{(T_1 - T_2) \ln(1 + 2e_{aisl}/d)} \end{aligned}$$

Si T_2 es igual a T_{amb} (por sencillez, por ejemplo a través de mantener un baño de agua a temperatura ambiente), esto resulta en:

$$\frac{Q_{trans}}{Q} = 4 \frac{k_{aisl}}{k \ln(1 + 2e_{aisl}/d)} \left(\frac{L}{d}\right)^2$$

De aquí se puede definir un orden de magnitud para el factor $\frac{1}{\ln(1 + 2e_{aisl}/d)} \left(\frac{L}{d}\right)^2$, el cual permite dimensionar el dispositivo para una relación $\frac{Q_{aisl}}{Q}$ aceptable, dado el valor de la conductividad del aislante (k_{aisl}) y un valor esperado (aproximado) de la conductividad a medir (k).

Fijando los siguientes valores:

$$k_{aisl} = 0,035 \text{ W/m K}$$

$$k = 1 \text{ W / m K (valor cercano al mínimo esperable)}$$

$$\frac{Q_{aisl}}{Q} < 0,01 \text{ (1\%)}$$

Obtenemos:

$$\frac{1}{\ln(1 + 2e_{aisl}/d)} \left(\frac{L}{d}\right)^2 < 0,01 \times \frac{1}{4 \times 0,035} = 0,071$$

Por otra parte, y para que la suposición de conducción unidimensional en el aislante, la relación entre L y e_{aisl} debería ser claramente mayor a 1, ya que de otra forma, las pérdidas por las caras laterales del aislante (efectos bidimensionales) serían muy significativas y no podrían despreciarse. Si para esta relación se impone un valor de 2 (aún muy bajo como para despreciar efectos bidimensionales), resulta:

$$\frac{1}{\ln(1+L/d)} \left(\frac{L}{d}\right)^2 < 0,071 \Rightarrow \frac{L}{d} < 0,069$$

Este valor es muy bajo y no deseable, ya que implica que se debe diseñar un dispositivo muy "chato", con una gran área de pasaje del calor.

Asimismo, se quiere medir un salto de temperaturas mínimo determinado (para asegurar errores bajos en la medición), por ejemplo de unos 20°C, considerando el uso de termocuplas tipo T de Clase 1 con un error estimado de +- 0,5°C (lo cual nos daría aproximadamente un máximo de un 5% de error en la medida de $(T_1 - T_2)$). Por otro lado, consideramos una distancia mínima entre caras opuestas (1 y 2) de alrededor de 5 cm, para minimizar heterogeneidades y efectos de borde en la porosidad de la mezcla de sedimentos y agua.

Como resultado se obtiene que el calor a imponer y el ancho necesario:

$$L = 5 \text{ cm}$$

$$d > 72 \text{ cm}$$

$$Q > 162 \text{ W}$$

Si bien el calor necesario no parece excesivo, las dimensiones del dispositivo no parecen muy adecuadas, dificultando el montaje.

Por esta razón, se modificó el diseño previsto hacia uno de configuración radial, en el que la geometría sea cilíndrica, pero la transferencia de calor se dé en el sentido radial y no longitudinal.

4.2.2.1.2 Configuración radial (final)

Se propone la medición del salto de temperaturas impuesto entre dos caras laterales de un prisma de sección anular, como se observa en la Figura 52. Las caras superior e inferior de dicho cilindro deben ser aisladas para asegurar que el calor no viaja en el sentido axial.

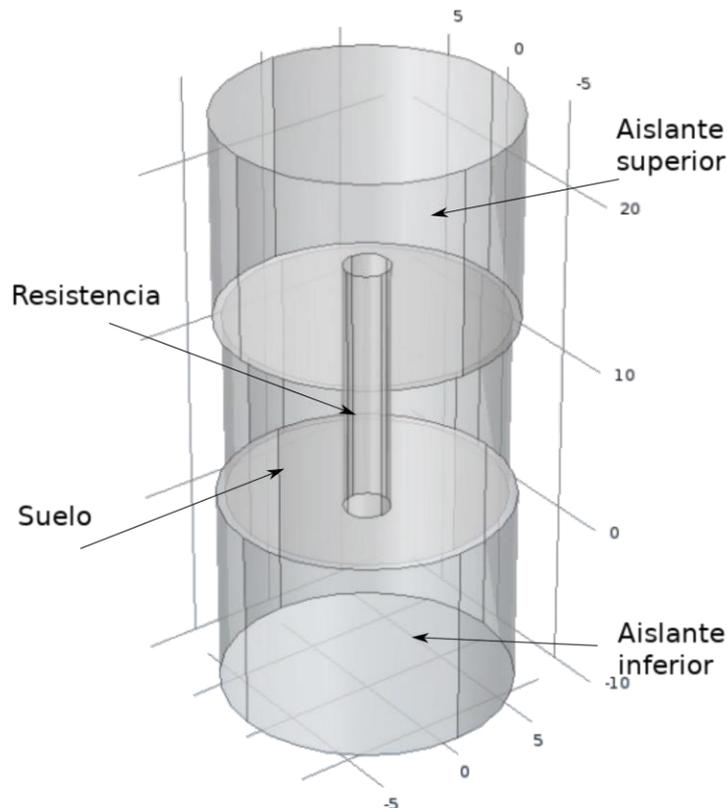


Figura 52: Geometría de la configuración experimental utilizada.

Esta configuración consta de una cavidad cilíndrica de sección anular que contiene la mezcla de sólido granular y agua (con la compactación y humedad adecuada), en el centro se coloca una resistencia eléctrica cilíndrica (de potencia controlada) y en las tapas superior e inferior un material aislante. De esta forma, la configuración del sistema de transferencia de calor responde a una conducción radial y el flujo de calor que libera la resistencia eléctrica se ve forzado a atravesar la muestra de suelo a la que se le desea medir su conductividad.

Para dimensionar inicialmente el dispositivo, se sigue una estrategia similar al de la parte anterior, en la que se tratan las resistencias a la transferencia de calor de forma simplificada, asumiéndolas unidimensionales (radial y longitudinal).

Para la resistencia interior, se asume un diámetro del orden de 1", para aproximarse a un dispositivo realista, el cual podría conseguirse en plaza.

Finalmente, se optó por las siguientes especificaciones, las cuales resultan en un dispositivo de dimensiones manejables y realistas.

$$d_i = 2,86 \text{ m}$$

$$d_e = 12,77 \text{ cm}$$

$$L = 11,65 \text{ cm}$$

$$e_{\text{aisl}} = 0,1 \text{ m}$$

$$R_{\text{elec}} = 19.9 \text{ ohm}$$

Asimismo, esta configuración permite resolver fácilmente el mantenimiento de temperatura "constante" en el exterior del cilindro, mediante inmersión en baño de agua.

4.2.2.2 Modelado numérico del sistema

Previo al ensayo experimental se simuló el sistema finalmente utilizado (Figura 52) en COMSOL y se evaluó el comportamiento térmico del mismo, así como el tiempo necesario para alcanzar el estado estacionario.

En este problema se resuelve la ecuación de calor para el sólido, los aislantes y la resistencia simultáneamente.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \Delta T$$

Considerando las condiciones de borde exteriores como convección natural en agua ($h=300\text{W/m}^2\text{K}$) y una generación de calor en la resistencia (igual a la potencia suministrada, en nuestro caso 32,2371W).

Las características geométricas del dominio del suelo son:

$$d_i = 2,7 \text{ cm}$$

$$d_e = 13 \text{ cm}$$

$L = 11 \text{ cm}$

Las propiedades consideradas para la simulación se describen en la Tabla 8.

Tabla 8: Propiedades del suelo y aislante.

Suelo	
Densidad (ρ)	1250 kg/m ³
Calor específico ()	2000 J/kgK
Conductividad térmica ()	2,5 W/mK
Aislante	
Densidad ()	20 kg/m ³
Calor específico ()	1500 J/kgK
Conductividad térmica ()	0,0342 W/mK

La geometría se discretizó en una malla no estructurada con las características descritas en la Tabla 9. En la Figura 53 se puede ver el tamaño de la malla relativa al dominio del suelo.

Tabla 9: Características de constructivas de la malla utilizada.

Número de vértices	40
Número de aristas	760
Número de elementos de frontera	9.096
Número de elementos	101.141
Calidad mínima de elemento	0,2098

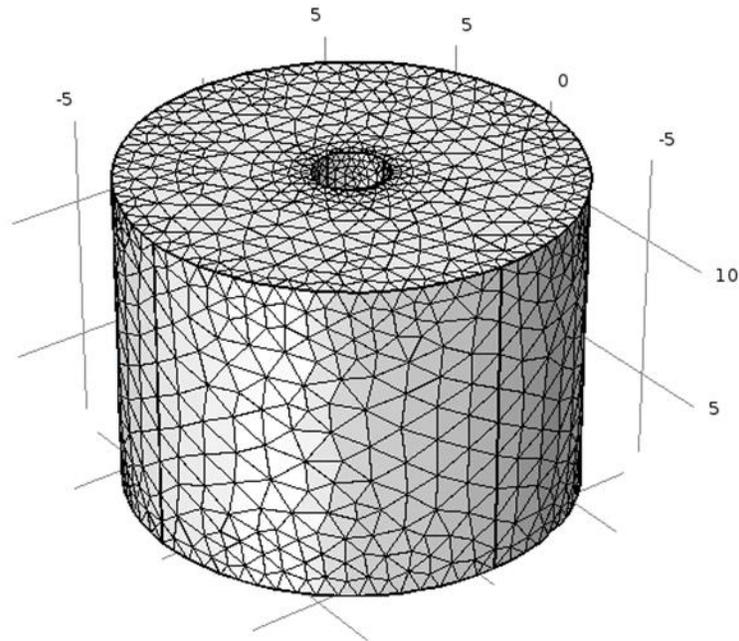


Figura 53: Representación de la malla para el dominio del suelo.

En la Figura 54 se muestra el campo de temperaturas para un tiempo de 10.000 segundos. Se puede observar que el perfil de temperaturas en el dominio del suelo, es bastante vertical y parece razonable asumir que el flujo de calor es radial.

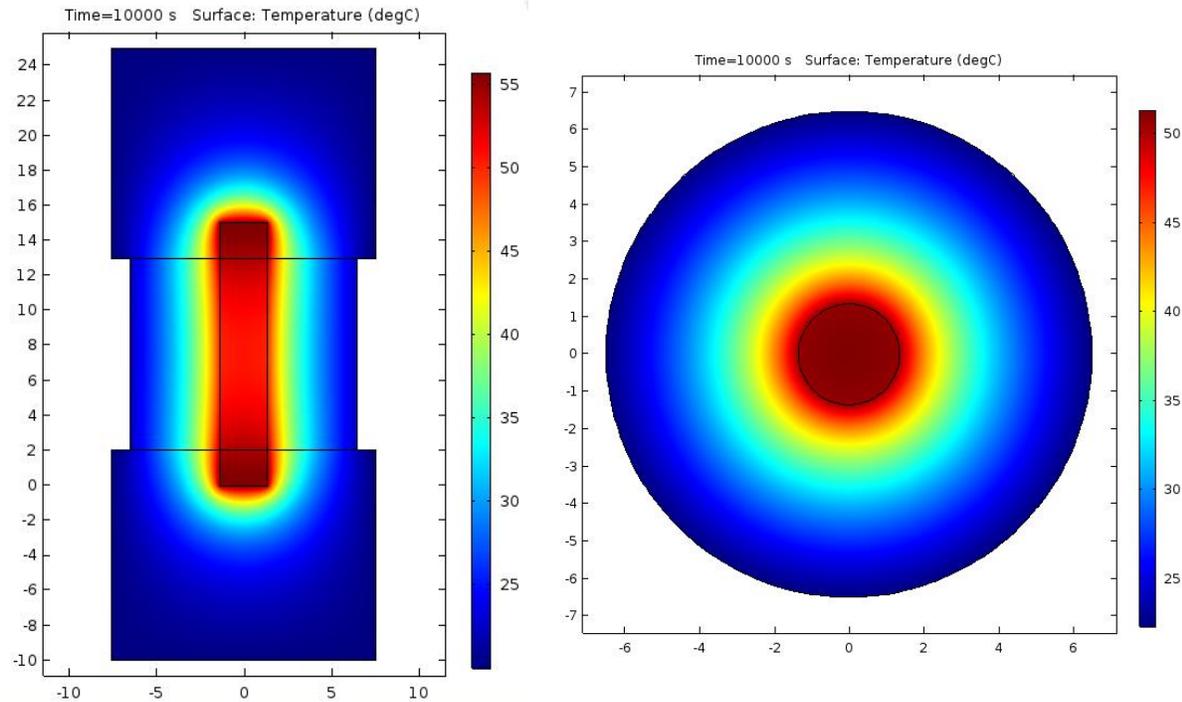


Figura 54: Campo de temperaturas para un tiempo de 10.000 segundos. a) vista de un corte vertical b) vista de un corte horizontal.

Para evaluar el tiempo necesario para alcanzar el estado estacionario, se analiza la temperatura en 3 puntos adyacentes a la resistencia, ubicados arriba, al centro y abajo. En la Figura 55 se presentan las evoluciones de las temperaturas para los tres puntos mencionados.

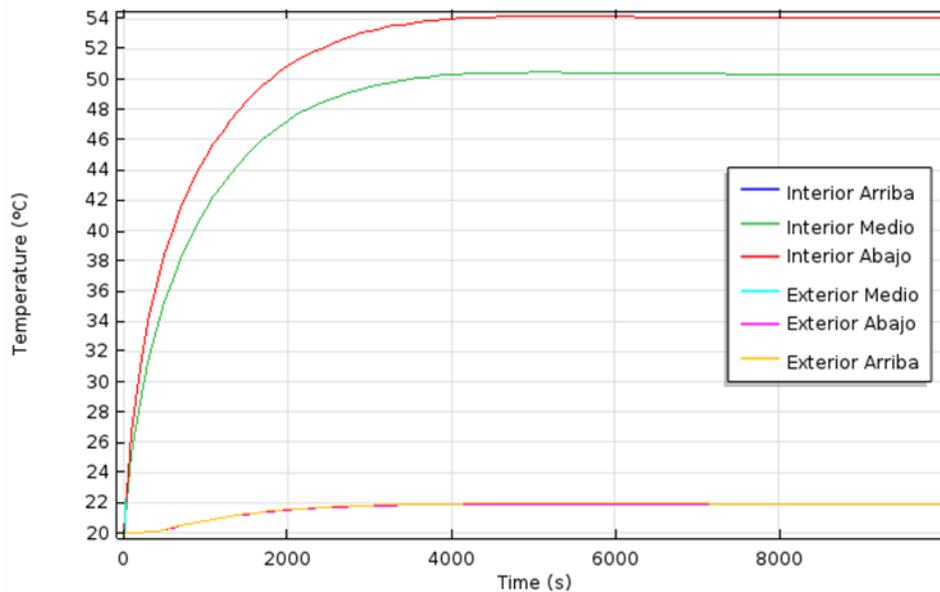


Figura 55: Evolución de temperaturas para tres puntos adyacentes a la resistencia (arriba, medio y abajo).

En la Figura 55 se puede observar como el campo de temperatura se comporta como una simetría de revolución y en el dominio del suelo, se percibe cómo el campo de temperaturas tiende a ser radial.

El objetivo del experimento es establecer una configuración que fuerce que todo el flujo de calor se desarrolle en una dirección radial, a través del dominio del suelo y de esta forma conociendo el calor aportado, los parámetros geométricos y las medidas de temperatura se pueden determinar la conductividad térmica del material.

Para evaluar la precisión de la medida, se evalúa numéricamente qué proporción del flujo de calor que se aporta al sistema atraviesa efectivamente el dominio del suelo.

Para ello se determina el flujo de calor a través de las fronteras del aislante superior e inferior y se compara con el flujo total.

El flujo de calor aportado por la resistencia es de 32,2371W

El flujo de calor se sale por las paredes del aislante superior e inferior es de 0,99W

Por lo tanto hay un 3% del calor que se pierde por el aislante.

Con el objetivo de determinar la conductividad térmica a partir de la configuración y compararla con la utilizada en el modelo se evalúan las temperaturas en las superficies del dominio del suelo. Cuando se integran los valores medios de temperaturas en la superficie de la resistencia contra el dominio del suelo y la superficie exterior se obtienen $T_i=51,316^{\circ}\text{C}$ y $T_e=22,319^{\circ}\text{C}$ respectivamente.

Considerando la ecuación de transferencia de calor por conducción

$$Q = \frac{2\pi Lk\Delta T}{\ln(d_e/d_i)}$$

Donde Q representa el flujo de calor radial, L la altura del dominio, k la conductividad térmica del material, ΔT la diferencia de temperaturas, d_e el diámetro exterior y d_i el diámetro interior. Se despeja la conductividad térmica y se evalúa con los valores del sistema

$$k = \frac{Q \ln(d_e/d_i)}{2\pi L \Delta T}$$

$$k = \frac{32,2371 \ln(0,13/0,027)}{2\pi 0,11 (51,316-22,319)} = 2.5282 \text{ W/mK}$$

Lo que corresponde a una diferencia de 1,1% con respecto al valor de 2,5 W/mK utilizado en la simulación. Por lo tanto es de esperar que el error de la medida en el ensayo experimental sea de ese orden.

4.2.2.3 Montaje y resultados experimentales

El montaje experimental se realizó en base a la configuración descrita en la Figura 52. En dicha configuración se emplearon dos cilindros concéntricos de acero galvanizado, con las medidas antes mencionadas. En el cilindro interior se colocó una resistencia eléctrica la cual es la fuente de calor para el ensayo.

Las dimensiones finales del dispositivo son las siguientes:

Tabla 10: Dimensiones de arreglo experimental.

Dimensiones	
d_i (cm)	2.86
d_e (cm)	12.77
L (cm)	11.65
V (lt)	1.417



Figura 56: Fotos de arreglo experimental. Izq vista desde arriba de arreglo destapado y con el material de subsuelo-agua colocado. Der: Vista exterior de arreglo pronto para ensayar.

La resistencia eléctrica se conecta con una fuente de corriente alterna la cual regula con exactitud la potencia manteniendo el aporte de calor al sistema constante durante el tiempo de ensayo.

En cada uno de los cilindros se soldaron termocuplas tipo “T”, estas tienen una precisión de medida de $\pm 0,5^{\circ}C$, son de Cobre-Constantán y tienen un rango de trabajo entre $-250^{\circ}C$ y $400^{\circ}C$ respectivamente. En el cilindro interior se colocaron en la pared exterior del mismo, 6 termocuplas, dispuestas en 3 alturas (inferior, media y superior), y en varias posiciones angulares en el caso de la sección media. Misma configuración pero en la parte interior del cilindro exterior se colocaron otras 6 termocuplas. Estas termocuplas se dispusieron enfrentadas a las anteriores, en sentido radial, para poder medir con mayor precisión el gradiente de temperaturas en cada sección.

La muestra de suelos que se utilizaron fueron las extraídas de uno de los pozos que se crearon. Estas se colocaron en el anillo que formaban los dos cilindros concéntricos, con la cantidad de agua correspondiente. Este último procedimiento se realizó midiendo las cantidades exactas de agua y muestra de suelo, de manera de calcular la porosidad y la densidad resultante del ensayo. Para esto se utilizó una balanza de precisión con una precisión de $0,1\text{ mg}$.

A los dos cilindros con la fuente de calor, se les colocó en los extremos dos cilindros de poliestireno expandido para que oficiaran de aislante térmico. A la tapa superior se le realizó un agujero en el centro de la misma, para sacar las termocuplas del cilindro interior y la conexión de la resistencia a la fuente de corriente.

Todo el arreglo se colocó en un cajón de plástico con una capacidad de 300 litros, el cual asegura que el experimento esté sumergido en agua y a su vez con un arreglo de entrada y salida de agua, nos aseguramos que la temperatura del agua a lo largo del ensayo no varía.

Para la adquisición de datos de temperatura se utilizó un adquisidor de NI cDAQ-9178 de la serie CompactDAQ de National Instruments con 4 adquisidores NI 9219, donde se conectaron doce termocuplas que sensaban la temperatura a la cual se encontraba la pared en contacto con el suelo a ensayar y dos termocuplas más que median la temperatura ambiente y la temperatura del agua del cajón. Se realizó un programa en Labview con la configuración necesaria para poder levantar los datos de temperatura y graficarlos.

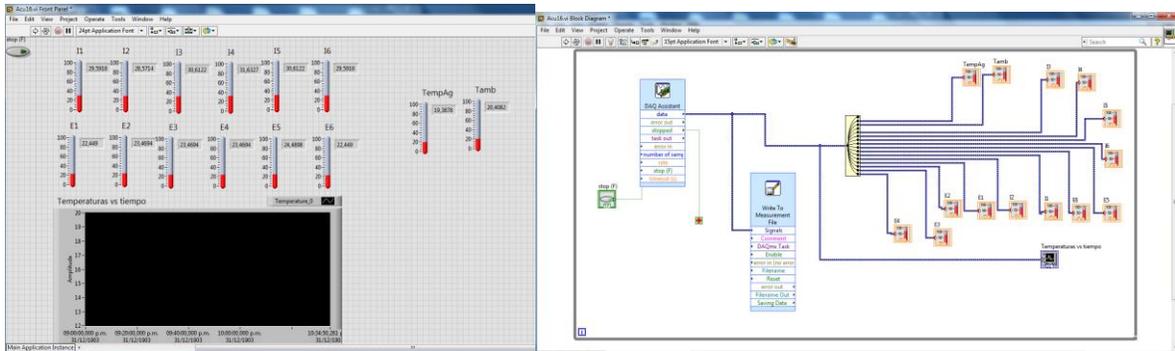


Figura 57: Imagen de programa de Labview para adquisición de datos.

4.2.2.3.1 Metodología de ensayo

Se prepara el ensayo, llenando el agua en el cubículo, conectando las termocuplas y encendiendo el adquiredor.

Luego se procede a colocar la muestra de suelo correspondiente en el espacio entre los cilindros. Para esto se colocan de forma alternativa, parte de agua y luego parte de la muestra de suelo, de manera escalonada, para evitar que permanezca aire retenido y así emular las condiciones existentes en el subsuelo. Este aspecto se considera importante, ya que un llenado diferente (por ejemplo, incluir agua luego de haber incluido el suelo) resulta en aire retenido y diferencias considerables en masa incluida, densidad, porosidad y finalmente conductividad térmica.

Se pesa tanto el agua como el sedimento, antes de colocarlo y luego el remanente en el recipiente, de forma de deducir el contenido efectivamente ingresado. Las cantidades de agua y suelo (en masa) son utilizadas para obtener resultados de densidad media de la muestra, porosidad (se deduce utilizando valores de bibliografía para las densidades de las fases de sólido y de agua) y calor específico medio (también utilizando valores obtenidos de bibliografía).

Para la determinación de porosidad (ϕ), se utilizan dos métodos. Por un lado, partiendo de la masa de agua (m_{ag} , medida) y la densidad de agua (ρ_{ag} , de bibliografía); y por el otro, a partir de la masa de suelo (m_s , medida) y la densidad de suelo (ρ_s , de bibliografía).

A continuación se presentan las expresiones utilizadas para esta determinación:

$$\phi_1 = \frac{m_{ag}}{\rho_{ag}} / V$$

$$\phi_2 = 1 - \frac{m_s}{\rho_s} / V$$

Siendo $V=1,417 \text{ lt}$ el volumen total ocupado por la muestra de suelo y agua. Para la determinación de las densidades de material sólido (ρ_s) para cada muestra, se utiliza la información de composición volumétrica porcentual de la Tabla 7 (sección 4.2.1.4 - Mineralogía), así como propiedades relevadas de bibliografía para cada mineral. En las tablas siguientes se presentan los valores utilizados.²

Tabla 11: Propiedades termofísicas de minerales y agua.

Propiedad	cuarzo	feldespato Pg	feldespato potásico	agua
ρ (kg/m ³)	2660	2695	2590	999
k (W/mK)	7.69	1.53-2.31	1.65-2.49	0.589
C_p (J/kgK)	698	700	610-680	4184

Tabla 12: Composición porcentual considerada, densidad total de sólido y capacidad térmica de cada muestra.

Mineral	16-17	17-18	21-22 (zona de inyección)	23-24
qz	86.5%	84.0%	74.0%	77.5%
fd pg	13.5%	15.0%	23.0%	21.5%
fd pot	0.0%	1.0%	3.0%	1.0%
ρ_s (kg/m ³)	2664.7	2664.6	2666.0	2666.8
$\rho_s C_p$ (kJ/m ³ K)	1860.7	1859.3	1858.0	1861.2

Se comparan los resultados de porosidad con uno y otro método, pero finalmente se adoptan los valores obtenidos con la determinación a partir del agua, ya que se considera que la densidad de la misma es conocida con mayor precisión que la del suelo.

Posteriormente, se procede a cerrar el dispositivo, colocando la tapa superior de aislante. Luego se coloca el dispositivo en la cuba con agua, arriba de un soporte, de forma de cubrir la parte del cilindro exterior que está descubierta, justo antes de comenzar la parte de aislante de la tapa superior.

² Notar que si bien hay incertidumbre en los valores de densidad y calor específico de cada mineral y de composición volumétrica de cada muestra, los valores de densidad total y capacidad térmica de fase sólida obtenidos son muy similares entre muestras (diferencias del orden de 0,1%).

Se da inicio al ensayo al encender la fuente y comenzar la disipación de calor a través de la resistencia.

Las temperaturas son registradas por el equipo. Una vez alcanzado lo que se considera un régimen estacionario (no hay variación apreciable de las temperaturas, o de la conductividad calculada, con el tiempo) se da por terminado el ensayo. El tiempo en el que se puede considerar que se logran estas condiciones es de alrededor de 2 horas en los ensayos llevados a cabo.

4.2.2.4 Resultados

4.2.2.4.1 Densidad, porosidad, capacidad calorífica

Se presentan en primer lugar los resultados de contenido de suelo, agua, densidad media y porosidad, para las diferentes muestras analizadas.

Tabla 13: Masas, densidades, porosidades y capacidades caloríficas de cada muestra ensayada.

Muestra	Masa de suelo (g)	ρ_s (g/lt)	Masa de agua (g)	ρ_{ag} (g/lt)	ϕ_1	ϕ_2	$\phi_1 - \phi_2$	ϕ	ρ_m (g/lt)	$(\rho C_p)_m$ (J/lt K)
16-17	2687.3	2664.7	382.7	999.0	27.0%	28.8%	-1.8%	27.0%	2167	2487.7
17-18	2809.9	2664.6	363.3	999.0	25.7%	25.6%	0.1%	25.7%	2239	2454.8
21-22 (Zona de inyección)	2646.8	2666.0	419.5	999.0	29.6%	29.9%	-0.3%	29.6%	2164	2546.0
23-24	2667.8	2666.8	433.6	999.0	30.6%	29.4%	1.2%	30.6%	2189	2571.4

Se observa que las porosidades obtenidas por ambos métodos (ϕ_1 y ϕ_2) difieren poco entre sí. Por otra parte, estos valores son en general más bajos que los de porosidad “compacta” observados en el ensayo de porosidad de la sección 4.6.1. Cabe recordar que aquellos corresponden a valores de porosidad “seca”, en el sentido de que el medio estaba compuesto por la fase sólida y aire, y no agua.

Tanto por el hecho de que el medio subsuelo es un medio saturado de agua, como por la gran variabilidad de los valores de porosidad “seca” de la sección 4.6.1, se considera que los valores de porosidad aquí determinados son más cercanos a los del medio real, y por lo tanto serán éstos los adoptados para el modelado posterior.

Se observa cierta correlación de la porosidad con la distribución granulométrica de la sección 4.6.1. Las muestras con menor porosidad se corresponden con las de mayor proporción de arenas finas (17-18 y 16-17), lo cual parece tener cierto sentido, ya que los granos más finos

pueden alojarse en los “huecos” dejados por los granos más gruesos, lo cual resulta en una mayor compacidad.

Con respecto a los valores de densidad media (conjunto suelo y agua), se observa una discrepancia menor entre las diferentes muestras (máxima diferencia de 3,5%). Algo similar ocurre con los valores de capacidad térmica media (máxima diferencia menor al 5%).

4.2.2.4.2 Conductividad térmica

La Figura 58 muestra la evolución de las temperaturas en uno de los ensayos realizados. Se puede observar un comportamiento similar al previsto por el modelo numérico.

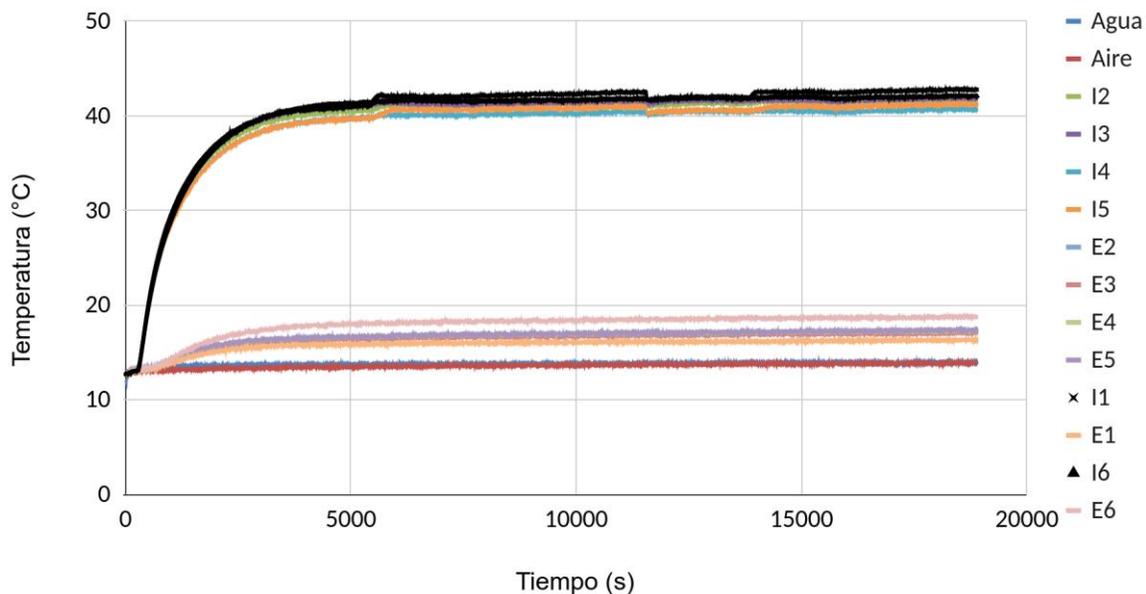


Figura 58: Evolución temporal de las temperaturas medidas, ensayo de muestra 17-18. Las medidas I2-I5, y corresponden a medidas en el cilindro interior, en la sección a una altura media del dispositivo. E2-E5, cilindro exterior, altura media. I1 y E1, medidas cerca de la sección inferior, en cilindros interior y exterior, respectivamente. I6 y E6 son medidas en la altura superior, en cilindros interior y exterior.

Algunas discrepancias observadas refieren al desconocimiento del lugar exacto en donde se ubica la resistencia eléctrica dentro de su vaina. Modificando levemente la profundidad hasta la que se introduce la resistencia en el cilindro interior, se observan diferencias en la evolución de las temperaturas interiores en las secciones inferior y superior. Esto se asume que se debe a que en caso de colocar la vaina resistencia más arriba, parte de la resistencia queda en la zona donde se encuentra el aislante superior, con lo cual se generan mayores temperaturas en la zona debido a que el calor debe conducirse mayoritariamente hacia la zona de la muestra, que está más abajo, y de allí salir por la misma hacia el agua del baño. Al colocar la vaina algo más abajo,

pasa lo mismo pero en la zona inferior, en donde en estos casos se observan mayores temperaturas en esa zona.

Teniendo en cuenta estos efectos no deseados, se procesan los datos realizando un promedio ponderado de las temperaturas de cada sección, asumiendo que son representativas de cierta porción de la altura del cilindro. Los resultados mostrados en la Tabla siguiente, se obtuvieron utilizando una ponderación de 60% para la temperatura media de la sección media (promedio de los sensores I2-I5), y 20% para cada una de las medidas en la sección superior e inferior. Dado que también se tomaron seis medidas para las temperaturas del cilindro exterior, también allí se hace una ponderación, pero en ese caso de igual peso para cada posición (33%).

En la Tabla 14 se detallan los resultados obtenidos. Se observa que las conductividades están entre los 2.5 y 2.82 W/m K, valores que se encuentran en el rango esperable.

Tabla 14: Resultados de conductividad para cada muestra,

Muestra (profundidad)	k (W/m K)
16-17	2.5
17-18	2.64
21-22 (Zona de inyección)	2.82
23-24	2.53

Si se compara estos resultados con la composición mineralógica presentada anteriormente, así como con la porosidad obtenida y contenido de agua resultante, no es posible trazar una correlación clara, ya que sucede que muestras con mayor contenido de cuarzo y menor contenido de agua, como las 16-17 y 17-18, resultan en una conductividad menor que las de la muestra 21-22 que tiene menor cantidad de cuarzo y mayor cantidad de agua.

Finalmente, cabe mencionar que dado que el dispositivo fue construido por los integrantes del proyecto, utilizando materiales de bajo costo y con ciertas incertidumbres acerca de la posición exacta de la resistencia dentro del cilindro interior y de las dimensiones de la zona donde se coloca la muestra (la forma no es exactamente cilíndrica), existe una incertidumbre en estos valores, que podría estimarse en al menos +-10%.

A futuro, podrían obtenerse resultados más exactos intentando obtener una mayor precisión en la colocación de la resistencia interior (lo más centrada posible) y realizando varias determinaciones para cada muestra.

5 Modelación

Dentro de los objetivos específicos planteados se buscaba desarrollar y utilizar modelos numéricos apropiados para la simulación del comportamiento térmico y fluidodinámico del sistema subsuelo-acuífero, así como validar dichos modelos con resultados numéricos y experimentales.

En base al relevamiento de códigos disponibles realizados se seleccionó el software ModelMuse para la simulación del comportamiento térmico y fluidodinámico del sistema subsuelo-acuífero.

Como parte del proceso de selección del software se evaluaron otras alternativas como OpenFOAM. Sin embargo, debido a que este software es de más amplio espectro (no específicamente diseñado para flujo subterráneo), si bien se realizó un acercamiento a los métodos para la modelación de acuíferos, no se continuó esta línea de trabajo.

ModelMuse consiste en una interfaz gráfica para los modelos desarrollado por el U.S Geological Service (USGS) MODFLOW (Harbaugh et al. 2000) y MT3DMS (Zheng and Wang 1999) entre otros. El software es de licencia gratuita y puede ser descargado desde la web del USGS.

Existe extensa información disponible sobre las características y aplicaciones de MODFLOW para la simulación de acuíferos en medios porosos. Información detallada sobre las características del software y sus componentes puede encontrarse en (Harbaugh, 2005).

El software MT3DMS es ampliamente usado para la simulación de transporte de solutos en medios porosos. Esto es demostrado en por varios autores. Martin et al. (2001) utilizaron MT3DMS para simular el transporte de calor en las Islas Gran Caimán. Cathomen (2002) y Cathomen et al. (2002) aplicaron MT3DMS para estudiar la distribución de temperaturas en un área urbana de Australia bajo la influencia de varios sistemas geotérmicos con bombas de calor.

El uso de MT3DMS para simular el transporte de calor en acuíferos tiene algunas limitantes, como ser el hecho de que está desacoplado del modelo de flujo. MT3DMS utiliza el campo de velocidades calculado por un simulador de flujo como puede ser MODFLOW.

Esto puede ser una fuente de error ya que las variaciones de temperatura afectan la viscosidad del agua y la densidad, de las que depende la conductividad hidráulica. Sin embargo, las variaciones de temperatura en sistemas geotérmicos someros en general son pequeñas, por lo que el error introducido en la simulación por la utilización de viscosidad y densidad constante también es pequeño y se encuentran dentro de lo aceptable.

Debido a que las ecuaciones que gobiernan el transporte de solutos son matemáticamente muy similares a las ecuaciones que gobiernan el transporte de calor, las ecuaciones que gobiernan el transporte en el subsuelo se pueden representar mediante ecuaciones diferenciales similares.

5.1 Simulación con MDT3DS

La ecuación diferencial parcial para el transporte de solutos en sistemas transitorios de flujo de agua subterránea resuelta por MT3DMS se puede escribirse de la siguiente manera (Zheng y Wang 1999):

$$\left(1 + \frac{\rho_b K_d}{n}\right) \frac{\partial C^k}{\partial t} = \text{div}[(D_m + \alpha v_a) \text{grad } C^k] - \text{div}(v_a C^k) - \frac{q_{ss} C_{ss}}{n} \quad (\text{Ec. 1})$$

Esta ecuación es esencialmente una declaración de balance de masa, es decir, el cambio en el almacenamiento de masa (tanto la fase disuelta como la absorbida) en un momento dado es igual a la diferencia en la entrada y salida de masa debido a la dispersión, advección, sumideros o fuentes y reacciones químicas.

Donde el término de la izquierda representa el término transitorio multiplicado por el factor de retardo R. Este factor adimensional denota la relación entre la concentración total de soluto y la concentración de soluto móvil dada por la distribución del contaminante en las fases líquida y sólida.

El primer término en el lado derecho de la (Ec. 1) es el término de dispersión hidrodinámica, incluyendo la difusión molecular (D_m) y la dispersión hidrodinámica (αv_a). El segundo término describe la advección y el tercer término representa fuente y sumideros.

De manera análoga, la ecuación de transporte de calor puede ser caracterizado por el principio de conservación del calor, incluyendo conducción y convección (de Marsily 1986):

$$n\rho_w C_w \frac{\partial T}{\partial t} + (1-n)\rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \text{div}[(\lambda_m + n\rho_w C_w \alpha v_a) \text{grad } T] - \text{div}(n\rho_w C_w v_a T) + q_h \quad (\text{Ec. 2})$$

Suponiendo que la temperatura del agua y el suelo son lo mismo, y que no hay transferencia neta de una fase a otro, es decir, el equilibrio térmico (Nield y Bejan 2006), el término en el lado izquierdo de la ecuación de transporte de calor se puede expresar de la siguiente manera:

$$n\rho_w C_w \frac{\partial T}{\partial t} + (1-n)\rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \rho_m C_m \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde $\rho_m C_m$ denota la capacidad calorífica volumétrica del medio poroso. Puede calcularse como la media aritmética del medio poroso y del agua (Anderson 2005; Hsu 2005; Hoehn and Cirpka 2006).

$$\rho_m C_m = n\rho_w C_w + (1 - n)\rho_s C_s = n\rho_w C_w + \rho_b C_s \quad (\text{Ec. 4})$$

Utilizando las (Ec. 2) y (Ec. 3), y reordenando los términos, la (Ec. 2) se simplifica:

$$\left(\frac{\rho_m C_m}{n\rho_w C_w}\right) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} \left[\left(\frac{\lambda_m}{n\rho_w C_w} + \alpha v_a \right) \text{grad } T \right] - \text{div}(v_a T) + \frac{q_h}{n\rho_w C_w} \quad (\text{Ec. 5})$$

Para relacionar la Ec 1 y Ec 5, los coeficientes se comparan de la siguiente manera y cada término para su implementación en MT3DMS se describe con más detalle:

1 Factor de retardo:

El factor de retardo (R) y el coeficiente de distribución (Kd) representada en la ecuación de transporte de solutos como la adsorción de solutos, se puede expresar de manera equivalente en la ecuación de transporte de calor como el intercambio de calor entre el sólido y el agua. El factor de retardo del calor se define como la relación entre la capacidad calorífica volumétrica del medio poroso (fase total) y la capacidad calorífica volumétrica del agua (fase móvil) (Shook 2001). El coeficiente de distribución se expresa como la relación entre el calor específico del sólido y la capacidad calorífica volumétrica del agua:

$$R = \frac{\rho_m C_m}{n\rho_w C_w} \quad (\text{Ec. 6})$$

$$K_d = \frac{c_s}{\rho_w C_w} \quad (\text{Ec. 7})$$

El nuevo coeficiente de distribución para el transporte de calor se implementa en MT3DMS en el paquete "Chemical Reactions Package". El tipo de sorción debe establecerse en una isoterma lineal (ISOTHM = 1) para mantener constante la tasa de intercambio de temperatura entre el sólido y el agua independientemente de cambios de temperatura.

2 Coeficientes de difusión y dispersión

En el término de difusión y dispersión de la ecuación diferencial parcial para el transporte de solutos (Ec. 1), identificamos dos partes. El primero es el término de difusión molecular pura (Dm)

que representa un proceso debido únicamente al gradiente de concentración. En la ecuación de transporte de calor, es equivalente a la difusividad térmica asociada al gradiente de temperatura:

$$D_h = \frac{\lambda_m}{n\rho_w c_w} \quad (\text{Ec. 8})$$

El segundo término de la (Ec. 1), la dispersión hidrodinámica (αv_a), es un proceso impulsado por las diferencias en velocidades de flujo a escala de poros. Para la implementación en MT3DMS, el coeficiente de dispersión de calor se aplica de manera análoga al transporte de solutos (Anderson 2005).

El nuevo coeficiente de difusión y el coeficiente de dispersividad se establecen en el paquete “Dispersion Package”.

3 Fuentes y sumideros

El término fuente y sumidero en la ecuación de transporte de solutos representan la masa que entra o sale del dominio. En la ecuación de transporte de calor, este término de fuente y sumidero indica la entrada o extracción de energía.

$$q_{ss}C_{ss} = \frac{q_h}{\rho_w c_w} \quad (\text{Ec. 9})$$

Para ser coherente con las dimensiones relativas a la transporte de contaminantes y calor, la unidad Kelvin (K) es equivalente a la concentración (kg / m³). Por lo tanto, la entrada / extracción de energía se establece de manera similar como una carga másica por unidad de volumen de acuífero.

El nuevo término de fuente y sumidero para el transporte de calor se implementa en MT3DMS en el paquete “Sink & Source Mixing” y el tipo de fuente debe establecerse en una fuente de carga masiva (ITYPE0 = 15).

5.2 Validación con casos de bibliografía

A continuación se detallan los casos de bibliografía simulados para la validación de la utilización del software MT3DMS. Se realizó validación con casos 2D y 3D.

En general, los problemas de flujo y transporte de calor solo se pueden resolver analíticamente para casos especiales. Dichos casos se caracterizan de la siguiente manera:

- Coeficientes constantes de la ecuación de flujo y transporte de calor y de las condiciones de contorno y, por lo tanto, medios porosos homogéneos se asumen. En el caso del transporte de calor, esto generalmente significa constante retardo térmico o velocidad térmica y temperatura constante coeficientes de difusión y dispersión.
- El dominio de flujo es suficientemente simple, por ejemplo, infinito o radialmente simétrico.
- La condición inicial es suficientemente simple, por ejemplo, constante o cero.
- Las condiciones de contorno son suficientemente simples, por ejemplo, constantes, o cero.

El desarrollo de las distintas soluciones analíticas existentes depende de si el sistema representado es abierto o cerrado. En sistemas cerrados sin extracción y/o reinyección de agua, a diferencia de los sistemas abiertos, no modifica el campo de flujo original. Las fuentes térmicas de las soluciones analíticas se pueden representar mediante una fuente puntual, una fuente de línea infinita (ILS) o una fuente de línea finita (FLS). Estos se muestran esquemáticamente en la Figura 59.

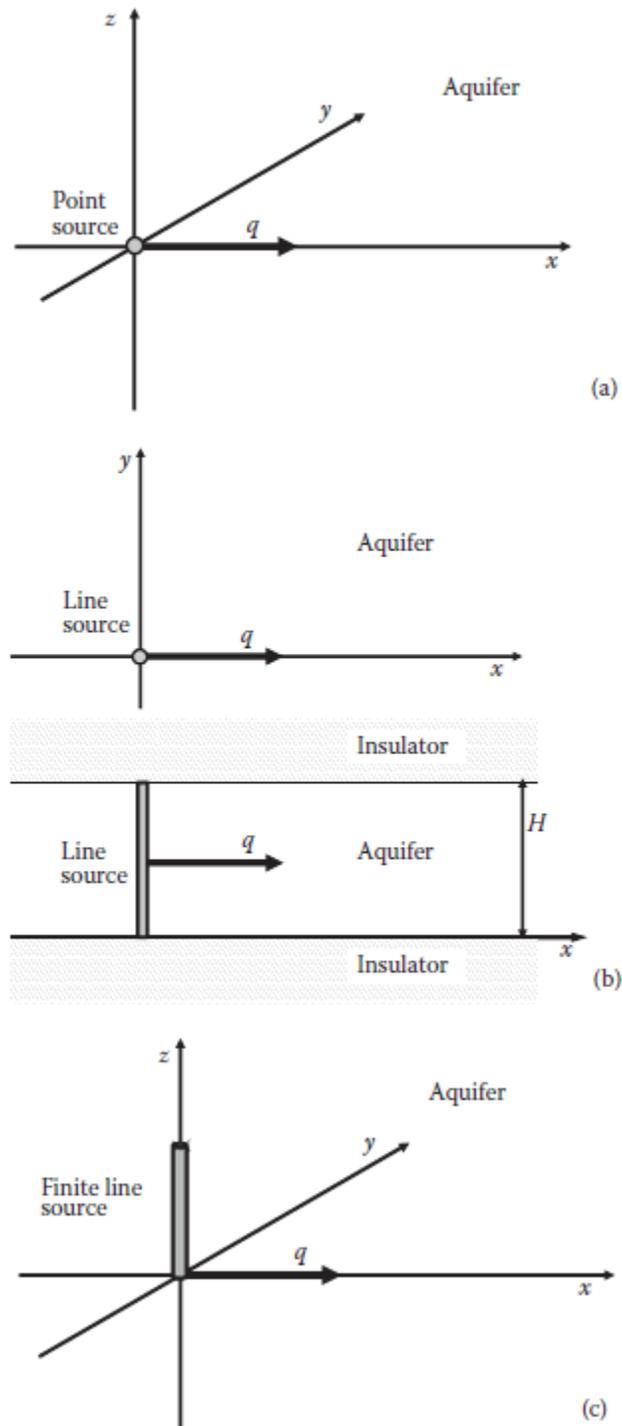


Figura 59: Tipos de fuentes térmicas. (a) Fuente puntual en un acuífero infinito con flujo q . (b) Fuente lineal en un estrato acuífero con confinado por capas aisladas, con flujo q . (c) FLS en un acuífero infinito con un flujo q . Extraído de *Thermal Use of Shallow Groundwater*.

Las soluciones analíticas utilizadas son desarrolladas a partir de la ecuación general de transporte de calor.

Se presenta a continuación el desarrollo realizado, partiendo de la ecuación general de transporte de calor. En este caso, la nomenclatura utilizada varía en referencia la ecuación presentada en el punto 5.1, utilizada para hacer la analogía entre la ecuación de transporte de contaminantes utilizada por MT3DS y la ecuación general de transporte de calor. El desarrollo completo, partiendo de la ecuación general de transporte hasta llegar a las soluciones analíticas particulares se presenta en el capítulo 2.1.2.4 del libro *Thermal Use of Shallow Groundwater*.

Con base en las expresiones para almacenamiento de calor, flujo de calor advectivo y conducción de calor, incluidos los efectos de macrodispersión térmica y suponiendo que las temperaturas medias del agua y la fase sólida son las mismas dentro del volumen de control, el balance de energía para una unidad de volumen de para un medio poroso saturado o insaturado se puede expresar como:

$$C_m \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot [(\lambda_m + \lambda_{disp}) \nabla T] - C_w \nabla \cdot (qT) + P_t \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde P_t es un término de producción térmica (producción de calor por unidad de volumen y unidad de tiempo) ($W m^{-3}$). La ecuación establece que la tasa de cambio del contenido de energía es igual a la entrada de energía menos la salida de un volumen de control unitario incrementado por la producción de energía en ese volumen. La suposición de una temperatura media igual en el agua y los sólidos de los medios porosos no es exactamente cierta a nivel microscópico (Moyné et al. 2000).

Dividiendo el balance energético de la Ec. (10) por la capacidad térmica volumétrica C_m y combinando los efectos de la conducción de calor y la macrodispersión térmica en un tensor de dispersión térmica D_t , se obtiene la ecuación de transporte de calor:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot [D_t \nabla T] - \frac{C_w}{C_m} \nabla \cdot (qT) + \frac{P_t}{C_m} \quad (\text{Ec. 11})$$

Adoptando una dependencia lineal del coeficiente de macrodispersión de la velocidad de Darcy, el tensor de difusividad térmica D_t en un medio hidráulicamente isotrópico tiene los principales componentes longitudinal y transversal:

$$D_{t,L} = D_{t,diff} + D_{t,disp,L} = \frac{\lambda_m}{C_m} + \frac{\beta_L C_w |q|}{C_m} \quad (\text{Ec. 12})$$

$$D_{t,T} = D_{t,diff} + D_{t,disp,T} = \frac{\lambda_m}{C_m} + \frac{\beta_T C_w |q|}{C_m} \quad (\text{Ec. 13})$$

El coeficiente de difusión térmica $D_{t,diff} = \lambda_m/C_m$ ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) de un medio poroso que representa únicamente el efecto de la conducción de calor es típicamente del orden de 10^{-7} a $10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ para los acuíferos granulares. Esto significa que es hasta tres órdenes de magnitud mayor que el coeficiente de difusión molecular. Por lo tanto, la dispersión termomecánica para medios porosos homogéneos no suele ser dominante en los problemas de transporte de calor. Puede ser del orden de magnitud similar a la difusión térmica.

Para situaciones típicas, el flujo macrodispersivo domina sobre el flujo de difusión térmica debido a la conducción de calor. En consecuencia, mantenemos la forma tensorial de la ecuación de transporte de calor.

Al comparar la ecuación de transporte de calor con la ecuación de transporte de una especie disuelta con sorción lineal y decaimiento de primer orden:

$$R_c \frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot [D_h \nabla c] - \nabla \cdot (cu) - \lambda_c R_c c \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde R_c es el factor de retardo (que tiene en cuenta los efectos de sorción lineal), c (kg m^{-3}) es la concentración de soluto, D_h es el coeficiente de dispersión hidrodinámica (tensor) ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), u (m s^{-1}) es el vector de velocidad de flujo media ($u = q/\phi$), y λ_c (s^{-1}) es el coeficiente de decaimiento. De la comparación, podemos ver que la variable T corresponde a c , el tensor de difusión térmica al tensor de dispersión hidrodinámico. La velocidad media del agua u corresponde a la velocidad térmica u_t (m s^{-1}):

$$u_t = q \frac{C_w}{C_m} \quad (\text{Ec. 15})$$

Esta relación se puede obtener mediante la condición de flujo térmico advectivo en medios porosos:

$$q C_w (T - T_0) = u_t C_m (T - T_0) \quad (\text{Ec. 16})$$

Como consecuencia, cuando el transporte de calor advectivo es dominante sobre la conducción de calor, un frente térmico en el agua subterránea se propaga con la velocidad térmica:

$$u_t = \frac{C_w \phi}{C_m} u \quad (\text{Ec. 17})$$

Que suele ser de 2 a 3 veces más pequeño que el del transporte de solutos en acuíferos sedimentarios. Por tanto, un frente térmico se retarda con respecto a un frente trazador ideal, con un factor de retardo térmico de:

$$R_{t_ret} = \frac{C_m}{\phi C_m} \quad (\text{Ec. 18})$$

A la hora de modelar, es importante saber si la macrodispersión térmica domina sobre la conducción de calor, o si la conducción de calor domina sobre la advección de calor. En el primer caso, la relación entre los flujos de calor dispersivo y advectivo puede expresarse mediante el número adimensional:

$$\frac{\text{thermal dispersive flux}}{\text{flux by heat conduction}} = \frac{\beta_L C_w q}{\lambda_m} \quad (\text{Ec. 19})$$

Dependiendo principalmente de la macrodispersividad longitudinal y los valores de flujo de Darcy, la relación indica el dominio del término respectivo. El segundo caso se describe mediante el número de Peclet térmico (Ec. 20).

$$Pe_t = \frac{C_w q d}{\lambda_m} \quad (\text{Ec. 20})$$

Para $Pe_t \gg 1$, los efectos de advección de calor dominan sobre la conducción de calor. Sin embargo, para velocidades de flujo muy pequeñas con $Pe_t \ll 1$, la de transporte de calor (Ec. 11) se reduce a la ecuación de conducción de calor.

$$C_m \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot [\lambda_m \nabla T] + P_t \quad (\text{Ec. 21})$$

Se puede escribir en forma de ecuación de difusión (Carslaw y Jaeger 1959):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot [D_t \nabla T] + P_t \quad (\text{Ec. 22})$$

Donde D_t es el coeficiente de difusión térmica (escalar) con $D_t = \lambda_m / C_m$.

Las cantidades características de propagación térmica, por lo tanto, dependen del número de Peclet térmico Pe_t . Para valores muy pequeños, se necesitan los coeficientes λ_m y C_m . Los parámetros característicos para números Pe_t mayores son el campo de flujo específico $q(x, t)$ (flujo de Darcy), la relación de capacidad térmica C_w / C_m , y el tensor de difusividad térmica D_t .

Este último suele estar dominado por efectos macrodispersivos caracterizados por las macrodispersividades longitudinales y transversales β_L y β_T . La relación C_w/C_m es de aproximadamente 1,8 para los acuíferos granulares. La conductividad térmica de los materiales porosos λ_m todavía es necesaria para expresar los flujos en los límites.

5.2.1 Moving ILS - two-dimensional conduction and advection

Un ILS en un acuífero con flujo uniforme según la Figura 59 corresponde al ILS con movimiento (MILS). Al aplicar la teoría de la fuente en movimiento a la de ILS (Ec. 23) se obtiene la solución analítica para la respuesta de una fuente lineal constante de longitud infinita a lo largo de la dirección vertical con una tasa de flujo de calor continuo $q_{tb} = J / H$ por unidad de longitud del pozo, o el modelo MILS (Ec. 25) (Metzger et al. 2004. Y Molina-Giraldo et al. 2011).

$$T(x, y, t) = T_0 + \frac{q_{tb}}{4\pi\lambda_m} \int_0^t \exp\left(-\frac{r^2}{4D_t(t-t')}\right) \frac{dt'}{t-t'} \quad (\text{Ec. 23})$$

$$T(x, y, t) = T_0 + \frac{q_{tb}}{4\pi\lambda_m} \int_0^t \exp\left(-\frac{\{x - u_t(t-t')\}^2 + y^2}{4D_t(t-t')}\right) \frac{dt'}{t-t'} \quad (\text{Ec. 24})$$

Como forma de simplificar la ecuación, la fuente se ubica en $X_0 = Y_0 = 0$. Aplicando el cambio de variable $\psi = r^2/4D_t(t-t')$, $dt'/(t-t') = d\psi/\psi$ y $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, se obtiene:

$$T(x, y, t) = T_0 + \frac{q_{tb}}{4\pi\lambda_m} \exp\left[\frac{u_t x}{2D_t}\right] \int_{r^2/4D_t t}^{\infty} \exp\left[-\psi - \frac{u_t^2 r^2}{16D_t^2 \psi}\right] \frac{d\psi}{\psi} \quad (\text{Ec. 25})$$

Para el caso estacionario, la ecuación se expresa como (Carslaw and Jaeger 1959):

$$T(x, y) = T_0 + \frac{q_{tb}}{2\pi\lambda_m} \exp\left[\frac{u_t x}{2D_t}\right] K_0\left[\frac{u_t \sqrt{x^2 + y^2}}{D_t}\right] \quad (\text{Ec. 26})$$

Donde K_0 es la función de Bessel modificada de segundo tipo y orden cero. Las ecuaciones (Ec. 25) y (Ec. 26) y 3.38 han sido utilizadas previamente por Sutton et al. (2003), Zubair y Chaudhry (1996) y Diao et al. (2004) para calcular la resistencia del suelo, las distribuciones de temperatura para la extracción / inyección de energía dependiente del tiempo y los efectos de la advección del agua subterránea en los sistemas de bombas de calor geotérmicos.

5.2.1.1 Comparativa entre MT3DS y MILSsd:

Se compararon las soluciones analíticas de las ecuaciones MILS en estado estacionario y transitorio contra los resultados del MT3DS.

5.2.1.1.1 Caso 2D

El escenario modelado comprende un dominio rectangular de una capa que representa un acuífero confinado (Figura 60). El tamaño del dominio es 300 m x 200 m con un tamaño de grilla espaciado regular de 0.5 m. El espesor del dominio es de 13 m. El BHE está representado por una celda fuente (posición $x = 50$ m, $y = 100$ m) de tamaño 0,1 m x 0,1 m, donde se extrae la energía en todo el espesor simulado. Para ello, cerca de la celda fuente, la malla fue refinada de 0.5 m a 0.1. La transferencia de calor vertical es despreciada por ser un caso 2D. Mayor detalle del caso de aplicación puede encontrarse en “Evaluating MT3DMS for Heat Transport” (Mendez et. al; 2010).

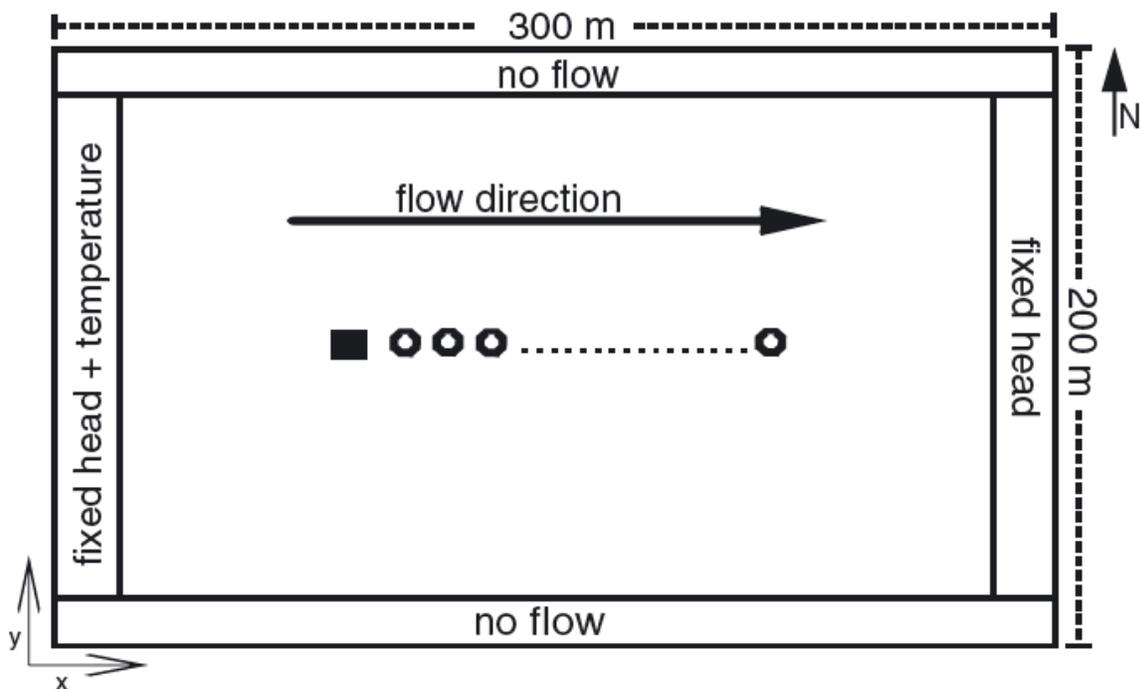


Figura 60: Esquema del modelo implementado. Condiciones de carga constante en los bordes este y oeste. En el borde oeste se fija condición de temperatura constante del acuífero. El rectángulo negro representa el BHE, los círculos representan pozos de observación donde se reporta la temperatura. Extraído de (Méndez et. al; 2010).

Las condiciones de contorno de Dirichlet se asignan a los límites este y oeste del modelo de flujo. Se definen tres escenarios para la modelación donde se varía el número de Peclet y por ende la velocidad de flujo. Las características de cada escenario se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15: Características de los escenarios simulados en MT3DMS.

Escenario	Pe	Gradiente	Seepage Velocity (v_e)
1	0	0	0
2	1	1.2×10^{-4}	3.7×10^{-6}
3	10	1.2×10^{-3}	3.7×10^{-5}

Se adoptó una conductividad hidráulica homogénea de 8×10^{-3} m/s, que está dentro de la variedad de acuíferos de arena típicos (Spitz y Moreno 1996). Se supone una densidad uniforme inicial de $999,49 \text{ kg/m}^3$ para todo el dominio. Se asigna una temperatura inicial de $285,15 \text{ K}$ a todo el dominio. Condiciones de contorno térmico constante (Dirichlet) se aplican solo en el límite oeste. En los límites norte y sur, se evitan los flujos térmicos para mantener una solución que se pueda comparar con la solución analítica. En la celda fuente de BHE, se define una extracción de energía de 60 W/m (Ec. 9), lo que totaliza una extracción de 780 W para los 13 m de espesor considerados.

En la Figura 61 se presentan los resultados obtenidos, donde se compara la solución analítica con los resultados de la simulación numérica con MT3DMS. Los resultados del transitorio se muestran para un tiempo de 10 días de iniciada la extracción mediante el BHE.

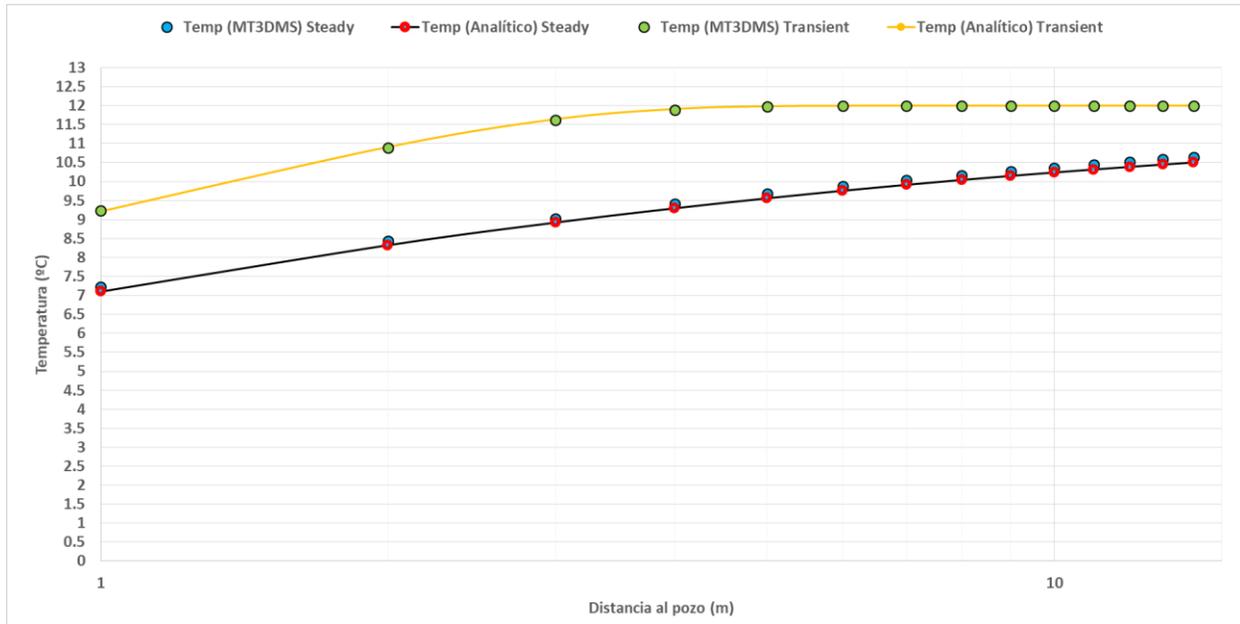


Figura 61: Comparativa entre solución analítica MILSsd y modelación en MT3DMS.

5.2.1.1.2 Caso 3D

El escenario modelado es idéntico al caso anterior, con la diferencia que se discretizó el dominio en 13 capas horizontales. La extracción de energía en el pozo se distribuye de igual manera entre las 13 capas.

En la Figura 62 se presentan los resultados obtenidos, donde se compara la solución analítica con los resultados de la simulación numérica con MT3DMS. Los resultados del transitorio se muestran para un tiempo de 10 días de iniciada la extracción mediante el BHE.

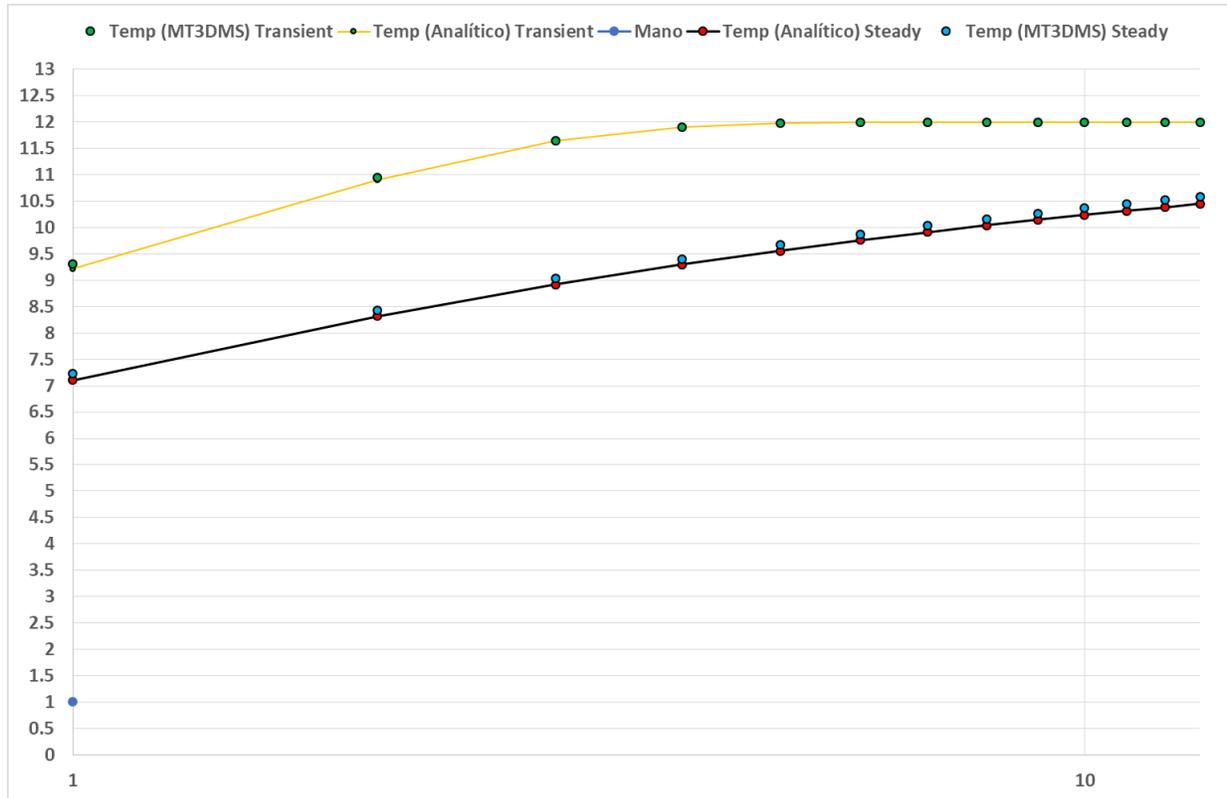


Figura 62: Comparativa entre solución analítica MILSsd y modelación en MT3DMS, caso 3D.

5.3 Simulación del caso experimental

Actualmente se tiene armado el modelo numérico del sector acuífero a modelar en el software ModelMuse, mediante la utilización de MODFLOW y el paquete MT3DMS. Se han procesado y cargado los datos de inyección de caudal y temperatura al modelo y se está a la espera de finalizar el ciclo de extracción para avanzar en la calibración y validación del modelo en base a los datos experimentales.

Se avanzó en el armado del modelo de Colonia Wilson en el software ModelMuse para simular el transporte de calor en el acuífero mediante el código MT3DMS. Se han procesado y cargado los datos de inyección de caudal y temperatura al modelo y se está a la espera de finalizar el ciclo de extracción para avanzar en la calibración y validación del modelo en base a los datos experimentales.

6 Divulgación y difusión

A lo largo del proyecto se realizaron distintas actividades de divulgación y difusión. Entre ellas, se destaca:

- Taller en la escuela de Colonia Wilson
- Ingeniería de Muestra
- Congresos AUGM y Solar World Congress, 2019

Taller en la escuela de Colonia Wilson

Una de las actividades incluidas en el proyecto era la realización de actividades de difusión con la comunidad en Colonia Wilson, sitio donde fue instalada la estación experimental.

Se realizaron 3 jornadas de divulgación en la escuela rural de Colonia Wilson, entre noviembre y diciembre de 2018, en conjunto con la Unidad de Enseñanza de FING y dos estudiantes de la Facultad de Información y Comunicación. Ambos estudiantes realizaron su práctica final en el diseño y ejecución de talleres de divulgación en la escuela.

En cada jornada se realizaron actividades con los niños y los padres. Se diseñó y colocó en la escuela cartelera informativa sobre el proyecto y su alcance la cual se encuentra instalada en la actualidad.

Ingeniería de Muestra

El proyecto fue presentado en la edición 2019 de Ingeniería de Muestra, la cual se realizó los días 10, 11 y 12 de Octubre de 2019.

Dentro de la muestra, se contó con stand en el que se presentó una maqueta interactiva sobre el proyecto. Junto a la maqueta, se colocó un monitor donde se mostraban imágenes del taller realizado en la escuela de Colonia Wilson.

Congresos

Se realizaron presentaciones (oral y póster) en dos congresos (II Congreso de Agua Ambiente y Energía, 2019, Montevideo; ISES Solar World Congress 2019, Chile) en las cuales se presentó el proyecto, con descripción de objetivos, instalación experimental, y primeros resultados.

7 Trabajo a futuro – Pasos a seguir

Se busca comparar la energía inyectada con la energía que es posible almacenar en el acuífero para su posterior utilización en acondicionamiento térmico mediante bomba de calor o uso directo. En paralelo, se está trabajando con modelos numéricos de forma de simular el comportamiento del sistema, utilizando las mediciones experimentales para la comparación y calibración de los modelos.

En 2020 se completó un ciclo completo de inyección y extracción y en 2021 se está realizando un nuevo ciclo. De esta forma cuantifica la energía que es posible extraer y determinar la eficiencia y viabilidad del sistema. Asimismo, se está evaluando el efecto de cambiar la temperatura de inyección en la energía finalmente recuperada.

Otros experimentos como el periodo óptimo de inyección, el momento más adecuado para comenzar la extracción y otras variables para optimizar la explotación de la energía solar térmica acumulada pueden ser realizadas en la instalación experimental.

Sería deseable, asimismo, combinar esta instalación con el agregado del sistema de bombeo de calor y acondicionamiento de la escuela.

8 Referencias bibliográficas

- Anderson, M.P. 2005. Heat as a ground water tracer. *Ground Water* 43, no. 6: 951–968.
- Astier, J.L. (1975). *Geofísica aplicada a la hidrogeología*. Paraninfo.
- Cathomen, N. (2002). *Wärmetransport im Grundwasser: Auswirkung von Wärmepumpenanlagen auf die Grundwassertemperatur am Beispiel der Gemeinde Altach im Vorarlberger Rheintal* [Tesis de maestría]. Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft. <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/146201/1/eth-25147-01.pdf>
- Chaer, R, Gurin, M, Cornalino, E, Draper, M, Terra, R, Abal, G y Alonso-Suárez, R. (2014.). *Complementariedad de las energías renovables en Uruguay y valorización de proyectos para el filtrado de su variabilidad*. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/21647>
- Cruickshank CA. (2009). Evaluation of a stratified multi-tank thermal storage for solar heating applications. PhD [Thesis]. Queen's University.
- De Marsily, G. (1986). *Quantitative hydrogeology*. Paris School of Mines.
- Diao, N., Li, Q., & Fang, Z. (2004). Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection. *International Journal of Thermal Sciences*, 43(12), 1203-1211. doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2004.04.009
- Dincer, I.; Rosen, M.A. (2007). Energetic, exergetic, environmental and sustainability aspects of thermal energy storage systems. In *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption*; Paksoy, H.O., Ed.; Springer: Dordrecht., pp. 23-46.
- Haller, MI, Cruickshank, CA, Streicher, W., Harrison, SJ, Andersen, E. y Furbo, S. (2009). Methods to determine stratification efficiency of thermal energy storage processes – Review and theoretical comparison. *Solar Energy* 83 (10), [1847-1860](https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.06.019). [doi:10.1016/j.solener.2009.06.019](https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.06.019)
- Harbaugh, A. W. (2005). *MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process* (Vol. 6). Reston, VA. US Department of the Interior, US Geological Survey. https://wwwbr.cr.usgs.gov/hill_tiedeman_book/documentation/MODFLOW-MODPATH-ModelViewer/MF2005-tma6a16.pdf
- Harbaugh, AW, Banta, ER, Hill, MC y McDonald, MG (2000). Modflow-2000, la u.S. Guía del usuario del modelo modular de aguas subterráneas para estudios geológicos sobre los conceptos

de modularización y el proceso de flujo de aguas subterráneas. U.S. Geological Survey. https://inside.mines.edu/~epoeter/583CSM/DOC3_MODFLOW2000_ModConcepts_GWFlowProcess_ofr00-92.pdf

Hecht-Méndez, J., Molina-Giraldo, N., Blum, P., & Bayer, P. (2010). Evaluating MT3DMS for Heat Transport Simulation of Closed Geothermal Systems. *Ground Water*, 48 (5), 741-756. doi.org/10.1111/j.1745-6584.2010.00678.x

Hoehn, E., & Cirpka, O. A. (2006). Assessing residence times of hyporheic ground water in two alluvial flood plains of the Southern Alps using water temperature and tracers. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(4), 553-563. <https://hess.copernicus.org/articles/10/553/2006/hess-10-553-2006.pdf>

Hooper, F. C. (1955). Possibility of complete solar heating of Canadian buildings. *Engenier*, 38(11).

Hsu, C.T. 2005. Dynamic modeling of convective heat transfer in porous media. In *Hand Book of Porous Media*, ed. K. Vafai, 2nd ed. Boca Raton: CRC-Taylor & Francis Group.

Kanoglu, M., Dincer, I. y Rosen, MA (2007). *Understanding energy and exergy efficiencies for improved energy management in power plants*. *Energy Policy*, 35 (7), 3967-3978. [doi:10.1016/j.enpol.2007.01.015](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.01.015)

Lengyel, A., Héberger, K., Paksy, L., Bánhidi, O. y Rajkó, R. (2004). *Prediction of ozone concentration in ambient air using multivariate methods*. *Chemosphere*, 57 (8), 889-896. [doi:10.1016/j.chemosphere.2004.07.043](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.07.043)

Linder S, Bhar R. (2007). Space conditioning in the residential sector in Europe, Deliverable 1 Ground Reach EU project. Ecofys. Available. http://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/groundreach_space_conditioning_in_the_residential_sector.pdf

López, A, A et al. (2018) Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (Tomografía eléctrica 2D y 3D).

Molina-Giraldo, N., Blum, P., Zhu, K., Bayer, P., & Fang, Z. (2011). A moving finite line source model to simulate borehole heat exchangers with groundwater advection. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(12), 2506-2513. [doi:10.1016/j.ijthermalsci.2011.0](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.0)

Moyne, C., Didierjean, S., Souto, H. A., & Da Silveira, O. T. (2000). Thermal dispersion in porous media: one-equation model. *International journal of heat and mass transfer*, 43(20), 3853-3867. [doi.org/10.1016/S0017-9310\(00\)00021-1](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(00)00021-1)

Natural resources Canada (NRCan). (s.f). Survey of household energy use—summary report. Available from: <http://oee.nrcan.gc.ca/Publications/statistics/sheu-summary/pdf/sheusummary.pdf>

Natural resources Canada (NRCan). Survey of household energy use—summary report. Available from: <http://oee.nrcan.gc.ca/Publications/statistics/sheu-summary/pdf/sheusummary.pdf>

Nield, D. A., & Bejan, A. (2006). *Convection in porous media* (Vol. 3). Springer.

Nielsen, K. (2003). *Thermal energy storage: A state-of-the-art. A report within the research program Smart Energy-Efficient Buildings at the Norwegian University of Science and Technology and SINTEF. Mineral Resources Engineering.* <https://www.sintef.no/globalassets/upload/smartbygg/wp3/thermal-energy-storage.pdf>

Novo, A. V., Bayon, J. R., Castro-Fresno, D., & Rodriguez-Hernandez, J. (2010). Review of seasonal heat storage in large basins: Water tanks and gravel-water pits. *Applied Energy*, 87(2), 390-397. doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.033

Orellana, HE (1972). *Documentación del programa informático del sistema de pavimento flexible FPS-11* (n.º provisional).

Paksoy, H.O.; Gurbuz, Z.; Turgut, B.; Dikici, D.; Evliya, H. (2004). Aquifer thermal storage (ATES) for air-conditioning of supermarket in Turkey. *Renew. Energy*, 29, 1991-1996.

Reynolds J. M. (1997). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons.

Schuler, M., Dierich, A., Chambon, P., & Metzger, D. (2004). Efficient temporally controlled targeted somatic mutagenesis in hepatocytes of the mouse. *genesis*, 39(3), 167-172. doi.org/10.1002/gene.20039

Shook, M.G. 2001. Predicting thermal breakthrough in heterogeneous media from tracer tests. *Geothermics* 30, no. 6: 573–589.

Spitz, K., & Moreno, J. (1996). *A practical guide to groundwater and solute transport modeling*. John Wiley and sons.

Stauffer, F., Bayer, P., Blum, P., Molina-Giraldo, N., and Kinzelbach, W.. (2013). *Thermal Use of Shallow Groundwater*. Prensa CRC. doi.org/10.1201/b16239

Sutton, M.G., Nutter, D.W., Couvillion, R.J. (2003). A ground resistance for vertical bore heat exchangers with groundwater flow. *Journal of Energy Resources Technology ASME* 125(3), 183–189.

Zheng, C., & Wang, P. P. (1999). MT3DMS: a modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; documentation and user's guide. *Engineer Research and Development Center*. <https://erdc-library.erdcdren.mil/jspui/bitstream/11681/4734/1/8648.pdf>

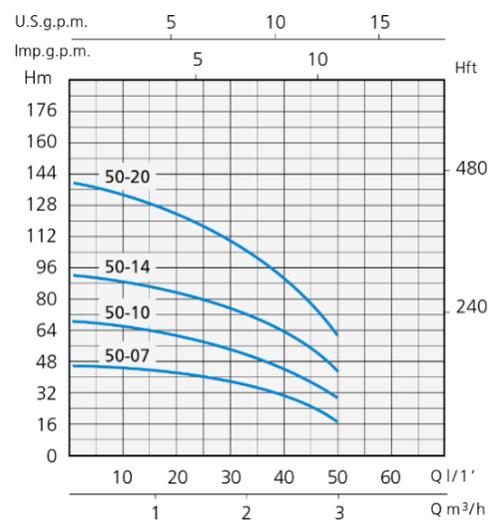
Zubair, S. M., & Chaudhry, M. A. (1996). Heat conduction in a semi-infinite solid due to time-dependent laser source. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39(14), 3067-3074. [doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)00388-6](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00388-6)

Zuñiga, R., (2011). *Detección de zonas de riesgo en la ciudad de Guatemala* [Tesis de Ingeniería Geofísica]. UNAM.

9 Anexo - Detalle de los componentes de la instalación

9.1 Bomba hidráulica

La extracción de agua de pozo se realiza con una bomba sumergible multietapa de 4 pulgadas de diámetro. Se seleccionó el modelo SP 4 – 50-07 de la marca Speroni.



9.2 Variador de frecuencia.

Para modular el caudal de agua extraído por la bomba se utiliza un variador de frecuencia marca Danfoss, modelo VLT Fc51 de 1Hp.



9.3 Colectores solares

Los colectores solares, de la marca ACF, vienen en módulos de 3m de largo por 0,5 de ancho. Son plásticos y sin cobertura, del tipo utilizado para calentamiento de piscinas. Se colocaron 20 módulos en dos baterías de 10 colectores, con un total de 30m².



COLECTOR SOLAR ACF		
MODELO	PLACAS 3 X 0,5M	PLACAS 4 X 0,5M
	10003	10004
Largura (m)	0,50m	0,50m
Comprimento	3m	4m
Espessura	10mm	10mm
Área	1,5m ²	2m ²
Matéria Prima	Polipropileno Copolímero Virgem com Anti UV	
Número de tubos	37	
Entrada e Saída	50mm	
Peso Vazio	3,45Kg	4,45Kg
Peso Cheio	11,3Kg	13,5Kg
Pressão de teste	5 Kgf/cm ² / 500KPa / 50 mca	
Pressão Máxima de Operação	2 Kgf/cm ² / 200KPa / 20 mca	

9.4 Sensores de temperatura y altura de pozos (divers)

Se tienen 6 divers colocados dentro de los pozos, a 16m de profundidad desde la superficie que se encargan de medir la temperatura y altura de agua del acuífero. Los sensores instalados inicialmente eran de la marca *Aqua*, los cuales no resultaron confiables ya que en poco tiempo empezaron a fallar y eventualmente dejaron de funcionar. Estos fueron reemplazados por divers de las mismas características técnicas, pero de otro fabricante, marca *Holykell* y han operado sin inconvenientes desde diciembre de 2019 hasta el momento.



9.5 Sensores de temperatura

La temperatura de entrada y salida de los colectores es medida con sensores de temperatura PT100 colocados en las tuberías correspondientes. Para comunicar estos sensores con el RTU donde se registran todas las medidas, se utiliza un conversor de señal de mV a 4-20mA (se detalla más adelante).



9.6 Piranómetro

El piranómetro, encargado de medir la radiación solar incidente en la zona de los colectores es de la marca *Hukseflux*, modelo SR11. Para comunicarse con el sistema de registro se utiliza también, un conversor de señal de mV a 4-20mA.



9.7 Caudalímetro

El caudalímetro es similar al mostrado en la figura. Mediante a un sensor magnético en la parte superior envía pulsos cada 1 litros de agua que circula, permitiendo contabilizar el caudal.



9.8 Sistema de control y telemetría

El RTU+ es un dispositivo electrónico que cuenta con entradas y salidas tanto digitales como analógicas, y diversas interfaces de comunicación integradas, y es un producto para implementar aplicaciones de monitoreo, adquisición y control sobre una red de datos distribuida. Todas las mediciones del sistema llegan al RTU que luego se comunica mediante internet, permitiendo el control y la monitorización a distancia.

Este equipo, además de plataforma web, fue proporcionado por la empresa Nettra.



9.9 Conversores de señal.

Para que el RTU pueda recibir las señales de los sensores de temperatura PT100 y del piranómetro se instalaron en el tablero conversores de señal PR 5334, que se encargan de pasar la señal de medida de mV a una señal 4-20mA.





UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

*Acumulación estacional de Energía Solar en Acuífero
para Acondicionamiento Térmico*