

RESEARCH ARTICLE

Inclusion of seismic refraction techniques in the characterization of the geological context for geothermal exploitation purposes

Inclusión de técnicas de sísmica de refracción en la definición del entorno geológico con fines de aprovechamiento geotérmico

Cristina Sáez Blázquez¹, Ignacio Martín Nieto¹, Pedro Carrasco García¹, Arturo Farfán Martín¹, Diego González-Aguilera¹

¹ Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno, Escuela Politécnica Superior de Ávila, Universidad de Salamanca, 05003 Ávila, España.

Corresponding author: u107596@usal.es (Cristina Sáez Blázquez)

Key points

Low enthalpy geothermal systems are essential for the decarbonisation of heating and cooling systems.

Seismic refraction prospecting techniques can be effectively used in the characterization of the shallow geothermal resource.

Seismic refraction allows the estimation of the ground thermal conductivity to guarantee an adequate design of the geothermal system.

Keywords: Low enthalpy geothermal energy; Geophysical techniques; Seismic refraction; Thermal conductivity.

Article History:

Received: 16/03/2023

Accepted: 26/07/2023

ABSTRACT

Given the growing importance of geothermal energy in the decarbonization of the energy sector, the application of appropriate methodologies that contribute to a greater knowledge of the resource is considered convenient. In this sense, refraction seismic techniques have proven to be a potential tool to predict the thermal behavior of the subsoil in locations where it is intended to implement a shallow geothermal system. From thermal conductivity measurements on samples with different degrees of compaction and consolidation, and from the propagation speeds of the P waves, a correlation pattern is developed that in turn allows obtaining 2D sections of the average thermal conductivity distribution in depth. The methodology developed shows that it is possible to estimate the evolution of the thermal conductivity parameter of the ground and thus guarantee an adequate design of the well field and the future correct operation of the geothermal system (providing the correct drilling length which would be underestimated by 30% with the standard thermal conductivity values).

Puntos clave

Los sistemas geotérmicos de baja entalpía son esenciales para la des-carbonización de los sistemas de calefacción y refrigeración.

Las técnicas de sísmica de refracción se pueden utilizar de manera efectiva en la caracterización del recurso geotérmico superficial.

La refracción sísmica permite estimar la conductividad térmica del suelo para garantizar un diseño adecuado del sistema geotérmico.

Palabras clave: Geotermia de baja entalpía; Técnicas geofísicas; Sísmica de refracción; Conductividad térmica.

RESUMEN

Ante la creciente importancia de la energía geotérmica de baja entalpía en la descarbonización del sector energético se considera conveniente la aplicación de metodologías adecuadas que contribuyan a un mayor conocimiento del recurso. En este sentido, las técnicas geofísicas de sísmica de refracción han demostrado ser una gran herramienta para predecir el comportamiento térmico del subsuelo en emplazamientos donde se pretende implantar un sistema geotérmico somero. A partir de mediciones de conductividad térmica sobre muestras con diferentes grados de compactación y consolidación y de los valores de velocidad de propagación de las ondas P, se desarrolla un patrón de correlación que a su vez permite la obtención de secciones 2D de distribución de la conductividad térmica media del terreno en profundidad. La metodología desarrollada muestra que es posible estimar la evolución del parámetro de conductividad térmica del subsuelo y así garantizar un diseño adecuado del campo de captación y el futuro correcto funcionamiento del sistema geotérmico (proporcionando la longitud de perforación correcta que se subestimaría en un 30% con los valores estándar de conductividad térmica).

Historial del artículo:

Recibido: 16/03/2023

Aceptado: 26/07/2023

1. Introducción

La energía geotérmica es considerada una de las fuentes renovables más relevantes en la lucha contra el cambio climático, como potencial alternativa a los hidrocarburos. En la actualidad, más de 20 países generan electricidad a partir de recursos geotérmicos y alrededor de 60 países hacen uso directo de esta energía (Moya *et al.*, 2018). Dada la importancia de estos recursos geotérmicos en el futuro desarrollo energético, son numerosas las investigaciones que se han realizado en los últimos años con objeto de cuantificar las características térmicas de diferentes regiones geológicas del mundo y evaluar su idoneidad como posible aprovechamiento geotérmico.

Un sistema geotérmico común se compone de cuatro elementos principales: una fuente de calor, un depósito o reservorio, un fluido encargado de transferir el calor, y un área de recarga. El entorno geológico en el que se encuentra un depósito geotérmico puede variar ampliamente. Los campos geotérmicos más grandes en explotación se localizan en entornos en formaciones rocosas que van desde calizas a pizarras, rocas volcánicas o granitos (Manzella, 1999). Aunque parece evidente que las formaciones volcánicas sean probablemente las más comunes en albergar estos reservorios, el contexto geológico no constituye un elemento decisivo a la hora de identificar un recurso geotérmico. Tal es así que, los factores más determinantes para definir un reservorio geotérmico no son las unidades rocosas, sino más bien la existencia de ciertos elementos estructurales como familias de fracturas o la presencia de flujo de calor anómalo. Este flujo de calor originario de un sistema geotérmico ocurre comúnmente en zonas de rift y zonas de subducción, donde importantes cantidades de calor son transportadas desde el manto a la corteza terrestre. Al margen de lo anterior, el aprovechamiento de energía geotérmica es también posible en zonas no volcánicas con flujos de calor relativamente normales. Esto conduce a distinguir las aplicaciones de producción eléctrica, usualmente ligadas a los recursos geotérmicos de alta y media entalpía, de las aplicaciones directas de generación de calor, asociadas a los recursos de baja y muy baja entalpía.

El programa de exploración, especialmente en el caso de recursos geotérmicos de alta y media entalpía, se basa en la detección de fenómenos asociados a la fuente original de calor, incluyendo

fracturación predominante en la zona o la disponibilidad del fluido para su circulación en la celda de convección y su futura recuperación en el campo de perforación (Salimzadeh *and* Nick, 2019). Estos factores son susceptibles de evaluación mediante el estudio de factores geológicos, y la aplicación de técnicas de prospección geoquímica y/o geofísica (Zeng *et al.*, 2012).

En este sentido, cabe destacar que la aplicación de técnicas geofísicas, basadas en el análisis de determinadas propiedades físicas de la tierra (resistividad eléctrica, potencial espontáneo, etc.), constituyen una herramienta esencial para caracterizar geológica y térmicamente un emplazamiento. De manera genérica, los reservorios geotérmicos suelen caracterizarse por su localización en estructuras irregulares y complejas, centrándose la exploración geofísica en la detección de anomalías de una o varias propiedades físicas relativas con respecto al valor normal del medio circundante. De esta forma, más que una interpretación cuantitativa precisa; es frecuente obtener alguna indicación de la calidad, tamaño y/o profundidad del sistema geotérmico evaluado.

Una campaña exhaustiva de evaluación de las posibilidades de aprovechamiento geotérmico comenzará con una revisión y coordinación de la información existente del emplazamiento (geología, hidrogeológica y parámetros específicos del sistema en cuestión). A partir de este reconocimiento inicial, se procederá a la implementación de técnicas capaces de detectar, desde la superficie, las anomalías en las propiedades del subsuelo que generalmente están asociadas al yacimiento geotérmico. Los parámetros físicos a analizar pueden incluir la temperatura (estudio térmico), la conductividad eléctrica (métodos eléctricos y electromagnéticos), la velocidad de propagación de las ondas elásticas (estudios sísmicos), la densidad del medio (gravimetría) o la susceptibilidad magnética (estudios magnéticos) (Pálmason, 1976).

En el caso de la exploración geotérmica para aprovechamientos con fines de producción térmica, es decir, a través de recursos geotérmicos de baja y muy baja entalpía, los esfuerzos se centran en definir la capacidad del subsuelo para transmitir el calor a los componentes de la instalación (fluido caloportador circulando por el intercambiador de calor de la o las perforaciones). Una práctica habitual es el empleo de métodos geofísicos (especialmente sísmicos, eléctricos y electromagnéticos) en los que, mediante la medición de un

cierto parámetro físico, permitan deducir la conductividad térmica de las formaciones que integran el subsuelo en la zona estudiada (Sáez *et al.*, 2017, 2019, 2020; Nieto *et al.*, 2020). En el caso de este estudio, se evalúan los métodos geofísicos de sismica de refracción en su contribución a la caracterización de los recursos geotérmicos de muy baja entalpía.

1.1. Prospección sísmica – sismica de refracción

Los métodos sísmicos se emplean ampliamente en diversos campos de la ingeniería, minería, exploración de aguas subterráneas e investigación de emplazamientos potenciales con objeto de comprender el comportamiento del subsuelo. Los resultados obtenidos son capaces de proporcionar información valiosa sobre el subsuelo, su geología y la tipología de formaciones rocosas o detección de posibles fracturas. La posibilidad de obtener imágenes y definir modelos de propagación de las ondas sísmicas en el subsuelo, convierte a estas técnicas en un recurso de vital importancia a la hora de caracterizar un recurso geotérmico (Shah *et al.*, 2015).

Dentro del conjunto de técnicas de prospección sísmica, cabe distinguir las variantes de sismica de reflexión y sismica de refracción. Tal y como se ha mencionado anteriormente, el presente estudio se enfoca en la aplicación de sismica de refracción para la definición del campo de captación de un recurso geotérmico de baja entalpía. A continuación, se detalla en profundidad esta metodología.

La refracción sísmica se fundamenta en la determinación de las variaciones en las velocidades de propagación de las ondas sísmicas correspondientes a las velocidades de transmisión en un medio sólido. El desarrollo de los ensayos consiste en la generación de ondas sísmicas mediante un martillo o un explosivo, y el registro de aquellas ondas que sufren refracción total a lo largo de los contactos de las capas del subsuelo de velocidad variable. Se diseñan así perfiles longitudinales compuestos por varios geófonos alineados, con diferentes impactos posicionados a lo largo del perfil. Las ondas registradas, son las ondas P primarias o longitudinales, en las que las partículas se mueven en la dirección de propagación de la onda, por compresiones y dilataciones. El sistema registra los tiempos de llegada de las ondas producidas por los impactos de un martillo sobre

una plancha de acero colocada en la superficie del suelo hasta su llegada a un conjunto de geófonos. Estos dispositivos transforman las vibraciones del suelo producidas por las ondas en señales eléctricas. De esta forma, el registro de los datos sísmicos y su posterior procesado permiten la formación de perfiles 2D que representan las velocidades de las ondas de compresión en el emplazamiento en cuestión. La Figura 1 muestra el desarrollo en campo de una campaña de sismica de refracción.



Figura 1. Desarrollo de ensayo de sismica de refracción. A) y B) perfiles y geófonos distribuidos en la zona de estudio, C) Plancha de acero, martillo percutor y cableado, D) Equipo registrador.

Figure 1. Development of seismic refraction test. A) and B) profiles and geophones distributed in the study area, C) Steel plate, hammer and wiring, D) Recording equipment.

El objetivo habitual de un estudio de refracción sísmica es definir la distribución del lecho rocoso y las velocidades de la onda de compresión de los materiales subyacentes. Los resultados se emplean para obtener información detallada acerca del espesor de las capas del subsuelo mediante los contrastes de velocidad de propagación de las ondas que lo atraviesan.

1.2. Caracterización geotérmica

La creciente demanda de instalaciones geotérmicas de muy baja entalpía, destinadas a la cubrir

la demanda térmica de un edificio, requiere atención especial sobre el diseño de estos sistemas. Un dimensionamiento incorrecto del campo de captación no solo puede suponer consecuencias importantes en el funcionamiento a corto y largo plazo del sistema, sino que también contribuye a incrementar la inversión inicial requerida, principal limitación de esta solución energética. Por estos motivos, es esencial llevar a cabo un análisis en profundidad del lugar proyectado para la instalación geotérmica. Tal estudio deberá abordar la caracterización térmica de los materiales del subsuelo y, en particular, su conductividad térmica. Este parámetro proporciona una aproximación de cómo será la efectividad del intercambio térmico entre el terreno y los componentes del sistema, y su valor afecta, de manera directa, al diseño final de las perforaciones geotérmicas (Rühaak *et al.*, 2015).

A pesar de la importancia del citado parámetro en el diseño de los sistemas geotérmicos someros, es actualmente complicado obtener una cuantificación fiable sin comprometer económicamente la viabilidad de la futura instalación. Determinados ensayos de laboratorio ofrecen una estimación aproximada de muestras aisladas, pero no constituyen una solución adecuada que represente la totalidad del terreno influyente en el funcionamiento del sistema geotérmico (Kukkonen *and* Lindberg, 1995; Blázquez *et al.*, 2016). Por su lado, los Test de Respuesta Térmica (conocidos como TRT) son capaces de proporcionar un valor de conductividad térmica representativo del conjunto de materiales que atraviesan la perforación. Su uso, sin embargo, queda limitado a grandes instalaciones donde sea económicamente viable asumir el coste adicional de la realización de este ensayo (Blázquez *et al.*, 2019).

Conocida la importancia de determinar esta propiedad física, y la dificultad de lograr una estimación efectiva y representativa del conjunto del medio estudiado, diversas técnicas geofísicas, como la incluida en este artículo, se presentan como una solución técnica y económicamente viable para la determinación de la conductividad térmica del subsuelo.

El objetivo de este artículo es analizar la aplicación de técnicas de sísmica de refracción en la caracterización térmica del subsuelo y su contribución en la optimización del diseño de sistemas geotérmicos someros. Así, se detalla en las siguientes secciones la metodología a abordar para obtener la evolución en profundidad de la conductividad térmica de un determinado emplazamiento

to a través de los resultados procedentes de los ensayos sísmicos. A su vez, se evalúa sobre un caso de estudio en particular, el papel que estas técnicas geofísicas juegan sobre la operación de una instalación geotérmica de muy baja entalpía a lo largo de su vida útil.

2. Metodología

Partiendo de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales es posible conocer la composición geológica de un determinado emplazamiento y, a su vez, su conductividad térmica. Esta estimación, ya realizada en estudios recientes (Blázquez *et al.*, 2018), parte de la correlación de la propiedad térmica con diferentes parámetros sísmicos.

La velocidad de propagación de las ondas sísmicas depende del material atravesado, al igual que ocurre con el mecanismo de conducción de calor. La similitud con la que ocurren ambos fenómenos (Khandelwal *and* Singh, 2009; El Sayed *and* El Sayed, 2019), ofrece importantes oportunidades en el campo del aprovechamiento geotérmico.

Así, para una misma composición geológica, la velocidad de transmisión de las ondas sísmicas es mayor en el caso de rocas duras y compactas y toma un menor valor en el caso de formaciones poco consolidadas. De la misma forma, la conductividad térmica de un material es también elevada si su grado de compactación y consolidación es alto. Es decir, una formación con un alto estado de deterioro y descomposición llevará asociado el menor valor de velocidad de propagación de las ondas P (dentro de esa familia geológica) que se propagan a través de él, y el mínimo valor de conductividad térmica. Por el contrario, el estado de máxima consolidación y compactación de una formación se corresponde con la mayor velocidad a la que estas ondas son capaces de transmitirse a través de ella, y al valor más alto de conductividad térmica para ese mismo medio.

Conocida la velocidad de propagación de las ondas P, mediante los ensayos de prospección de sísmica de refracción, y la conductividad térmica de los estados de mayor y menor alteración de muestras pertenecientes a esa misma formación, es posible obtener perfiles 2D que representen la evolución del parámetro de conductividad térmica en profundidad. Para comprender mejor esta metodología, se incluye en este artículo la aplicación del método sobre un emplazamiento

eminentemente granítico perteneciente a la provincia de Ávila (centro de España).

2.1. Ensayos térmicos - conductividad térmica

Tal y como se ha mencionado anteriormente, no es sencillo conocer el parámetro de conductividad térmica de un medio y su evolución en profundidad. Sin embargo, existen dispositivos, como el que aquí se presenta, que permiten medir valores puntuales de esta propiedad sobre muestras tomadas en campo. Este equipo, comercialmente conocido como TEMPOS, está configurado para la medición de las propiedades térmicas de conductividad, resistividad, difusividad y calor específico de muestras de suelos y rocas, además de hormigones, líquidos y nano fluidos.

El módulo aquí empleado de medición de la conductividad térmica cumple con las Normas ASTM D5334 e IEEE 442/D3 (ASTM, 2014; IEEE, 2017), basadas en el método del hilo caliente. El equipo lo compone un registrador portátil y un sensor determinado, en función de la superficie o aspecto a medir. En este estudio, se requiere el uso del sensor TR-3 (Figura 2) para la determinación de la conductividad térmica de suelos (muestras con el mayor grado de alteración y disgregación), y el sensor RK-3 necesario para la medición de la conductividad térmica de las muestras rocosas (con el mayor grado de compactación).

El funcionamiento de este dispositivo está basado en la teoría del hilo caliente, de manera que calcula la conductividad térmica de un material mediante la monitorización del calor disipado a través de la aguja del sensor. El desarrollo experimental se fundamenta en la aplicación de calor a través de la aguja durante un tiempo determinado t_h , y la medición de la temperatura durante el periodo de calentamiento y un tiempo adicional posterior. Así, la temperatura durante la fase de calentamiento se obtiene de la Ecuación 1.

$$T = m_0 + m_2 t + m_3 \ln t \quad (1)$$

Donde:

m_0 es la temperatura ambiente durante la fase de calentamiento.

m_2 es la tasa de variación de la temperatura de fondo.

m_3 es la pendiente de la línea que relaciona el aumento de temperatura y el logaritmo de temperatura.



Figura 2. Equipo TEMPOS con sensor de conductividad térmica TR-3.

Figure 2. TEMPOS equipment with TR-3 thermal conductivity sensor.

A su vez, durante la fase de enfriamiento, se cumple la Ecuación 2.

$$T = m_1 + m_2 t + m_3 \ln \frac{t}{t - t_h} \quad (2)$$

Por último, la conductividad térmica, k , se obtiene aplicando la Ecuación 3, que contempla el flujo de calor q .

$$k = \frac{q}{4m_3} \quad (3)$$

La Figura 2 muestra el equipo TEMPOS operando con el sensor de suelos TR-3 durante el proceso de medición de la conductividad térmica sobre las muestras de suelo consideradas en el emplazamiento considerado. Igualmente, se realizó la medición de la conductividad sobre muestras rocosas empleando en este caso el sensor RK-3.

2.2. Ensayos de sísmica de refracción – velocidad de ondas sísmicas

Tal y como se ha descrito anteriormente, la sísmica de refracción aporta la evolución de la velocidad de las ondas P desde la superficie has-

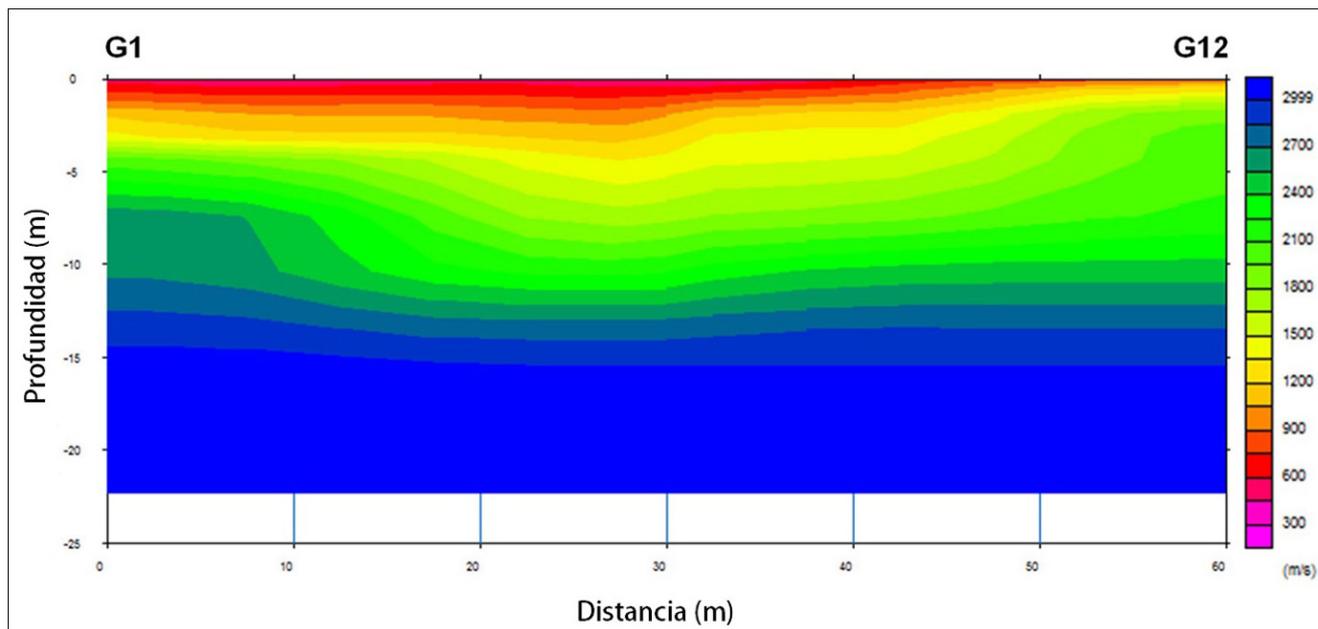


Figura 3. Sección 2D de la velocidad de propagación de las ondas P.

Figure 3. 2D section of the propagation speed of P waves.

ta una profundidad determinada por la longitud de los perfiles construidos en superficie y la separación entre geófonos.

Como resultado de la aplicación de este método, se obtiene una imagen sísmica terrestre del área estudiada en forma de sección de velocidad ($V(x, z)$). En el caso del presente estudio, se realizó un perfil de 60 m de longitud con geófonos colocados cada 5 metros, disparando en los extremos y centro de cada perfil. En la Figura 3, es posible observar la sección obtenida en la zona considerada.

3. Resultados obtenidos

3.1. Correlación de valores sísmicos y térmicos

En base a la semejanza en el comportamiento de las velocidades de propagación de las ondas sísmica y la conducción térmica, descrito en la Sección 2, se ha llevado a cabo el análisis de los resultados obtenidos de las campañas de sísmica de refracción y de medición de conductividades térmicas. Tal estudio, ha permitido establecer una correlación lógica entre las propiedades consideradas (velocidad de propagación de las ondas P y la conductividad térmica dentro de un mismo emplazamiento geológico).

A partir de la conexión de los valores de conductividad térmica más altos y más bajos con las mayores y menores velocidades de las ondas P res-

pectivamente, se desarrolla un patrón de correlación entre ambos parámetros para la formación en cuestión. El resultado de esta correlación se muestra en la Figura 4. Como se puede observar, la ecuación de la recta permite obtener para cualquier valor de velocidad de propagación de las ondas P, el valor estimado de conductividad térmica.

Finalmente, partiendo de la relación presentada anteriormente se obtiene la sección 2D que permite conocer cómo evoluciona el parámetro de conductividad térmica en profundidad para la formación geológica que se ha considerado. Esta evolución se muestra en la Figura 5.

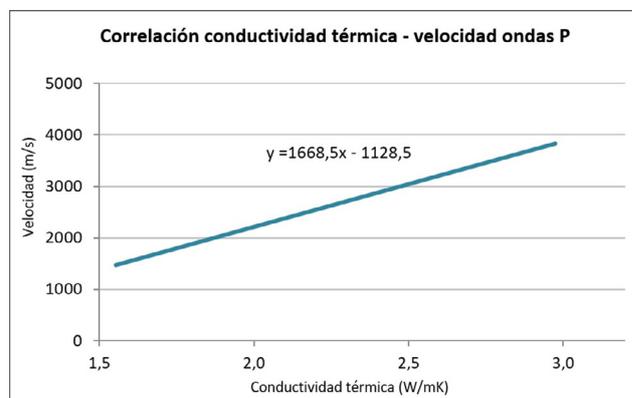


Figura 4. Correlación entre la velocidad de propagación de las ondas P y la conductividad térmica en el emplazamiento analizado.

Figure 4. Correlation between the propagation speed of the P waves and the thermal conductivity in the analysed location.

4. Discusión

Con objeto de resaltar la contribución de las técnicas geofísicas aquí consideradas sobre la caracterización térmica del terreno en el que se pretende instalar un sistema geotérmico de baja entalpía, en esta sección se incluye el dimensionamiento de una instalación partiendo de la información obtenida en el estudio.

4.1. Diseño geotérmico

Para llevar a cabo el dimensionamiento del sistema geotérmico considerado en este estudio, se ha empleado el software de cálculo geotérmico GES-CAL, desarrollado por investigadores de la Universidad de Salamanca (Blázquez *et al.*, 2020). Este programa solicita durante el proceso de cálculo una serie de inputs sobre la instalación y la zona donde se pretende implantar. Se considera para ello una vivienda unifamiliar localizada en la provincia de Ávila en la zona donde se han llevado a cabo los estudios sísmicos y de conductividad térmica. Las características iniciales de la instalación se presentan en la Tabla 1.

Además de la información incluida en la Tabla 1, durante el proceso de cálculo de GES-CAL se requiere la introducción por parte del usuario del parámetro de conductividad térmica del terreno, uno de los más influyentes sobre el diseño final del campo de captación. En el caso de no conocer este valor, la práctica habitual es recurrir a la bi-

Características del edificio	
Superficie	200 m ²
Altura	4 m
Orientación	Sur
Demanda energética	42950.40 kWh
Entorno geológico	Granito
Características del sistema geotérmico	
Intercambiadores de calor	Vertical doble-U, PE-100
Bomba de calor	Eléctrica
Material de relleno	Relleno geotérmico estándar
Fluido caloportador	Agua (75%) + anticongelante (25%)

Tabla 1. Información relativa al caso de estudio considerado.
Table 1. Information related to the considered case study.

bliografía existente para encontrar un valor genérico asociado a cada formación geológica. Sin embargo, la variabilidad de esta propiedad en función de las condiciones de composición y estructurales del emplazamiento, supone que tomar un valor estándar de conductividad térmica pueda llevar a importantes errores en la definición del campo de captación.

Por ello, en este trabajo se ha realizado el diseño geotérmico utilizando el valor de conductividad térmica global obtenido en el área del estudio con la metodología aquí propuesta, y se ha llevado a cabo una comparativa con respecto al diseño obtenido partiendo del valor estándar de conductividad térmica para la formación geológica de la zona. En la Tabla 2, se muestran los resultados obtenidos del diseño geotérmico correspondientes al Caso 1 (valor de conductividad térmica medio obtenido con la metodología aquí incluida – 2.3 W/mK), y al Caso 2 (valor de conductividad estándar para el granito – 2.8 W/mK (CTE, 2007)).

	Caso 1	Caso 2
Potencia bomba de calor (kW)	9.27	9.27
Longitud total del intercambiador (m)	314.38	265.25
Longitud de perforación (m)	173	133
Número de sondeos	2	1
Inversión Inicial (€)	26163.63	23895.48
Coste anual (€)	1353.51	1353.51
Emisiones CO ₂ (kg/año)	3833.32	3833.32

Tabla 2. Parámetros del sistema geotérmico obtenidos con GES-CAL para los dos casos considerados.

Table 2. Parameters of the geothermal system obtained with GES-CAL for the two cases considered.

4.2. Evaluación técnico-económica

De acuerdo con la Tabla 2, la potencia de la bomba de calor requerida en ambos sistemas es la misma, al igual que el coste anual y las emisiones de CO₂ asociados directamente al funcionamiento de este equipo. Esto se debe a que las condiciones de demanda energética son idénticas en ambos casos e independientes de las condiciones térmicas del terreno.

En lo que respecta al parámetro aquí analizado, se observa que en el Caso 2, introduciendo el

valor de conductividad térmica normalizado para las formaciones graníticas, la longitud del intercambiador de calor, de la longitud de perforación y del número de sondeos obtenido con GES-CAL, son menores que los obtenidos aplicando la conductividad térmica real del medio. Como consecuencia, la inversión anual requerida por el sistema geotérmico del caso 2 sería también menor.

Analizando los resultados comentados, se podría concluir que el caso 2 es el más ventajoso desde el punto de vista económico al reducirse la longitud de perforación requerida, y, por ende, la longitud de intercambiador de calor. Sin embargo, aceptar este diseño como válido, sin haber realizado una correcta caracterización térmica del terreno circundante, podría comprometer el futuro funcionamiento del sistema, siendo probables las siguientes situaciones:

- Mayor consumo de la bomba de calor geotérmica, y con ello mayor número de emisiones de dióxido de carbono asociadas a su operación.
- Insuficiencia del sistema para cubrir las necesidades energéticas normales de la vivienda y, especialmente en situaciones de picos de demanda.
- Enfriamiento excesivo del terreno, disminución del aporte térmico y aumento del periodo de recuperación y asimilación del fluido refrigerado recirculado.
- Aumento de los costes operativos del sistema geotérmico y reducción de la vida útil inicialmente proyectada.

5. Conclusiones

La expansión de los sistemas geotérmicos de baja y muy baja entalpía está directamente ligada a la implantación de tecnologías efectivas que justifiquen la moderada inversión inicial que actualmente requieren. Se considera por ello esencial centrar los esfuerzos en la primera fase de planificación y diseño de la instalación, y especialmente en caracterizar térmicamente el terreno en el que será implantada. En este sentido, las técnicas de prospección geofísica han demostrado ser una importante herramienta para conocer ciertos parámetros del terreno. La metodología incluida en este artículo demuestra que, partiendo de la medición de la velocidad de propagación de las ondas sísmicas es posible estimar la evolución del parámetro de conductividad térmica del subsuelo.

El conocimiento de esta propiedad térmica es a su vez indispensable para garantizar un diseño adecuado del campo de captación y el futuro correcto funcionamiento del sistema geotérmico durante la totalidad de la vida útil estimada. La aplicación de la metodología descrita actuaría así como garantía de haber optimizado el proceso de dimensionamiento geotérmico, asegurando que el sistema será capaz de cubrir la demanda energética para la que ha sido diseñado.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno de la Escuela Politécnica Superior de Ávila, Universidad de Salamanca, por permitirnos utilizar sus instalaciones y su colaboración durante la fase experimental de esta investigación. C. Sáez Blázquez agradece la subvención RYC2021-034720-I financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea “NextGenerationEU”/PRTR.

Referencias

- ASTM (D5334). Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure, ASTM INTERNATIONAL, 2014.
- Blázquez, C. S., Martín, A. F., García, P. C., and González-Aguilera, D. (2018). Thermal conductivity characterization of three geological formations by the implementation of geophysical methods. *Geothermics*, 72, 101-111.
- Blázquez, C. S., Martín, A. F., García, P. C., Sánchez Pérez, L. S., and del Caso, S. J., (2016). Analysis of the process of design of a geothermal installation. *Renewable Energy* 89(1), 188–199.
- Blázquez, C. S., Nieto, I. M., Mora, R., Martín, A. F., and González-Aguilera, D. (2020). GES-CAL: A new computer program for the design of closed-loop geothermal energy systems. *Geothermics*, 87, 101852.
- CTE (2007). Código Técnico de la Edificación, *Pronuario de Soluciones Constructivas*.
- El Sayed, A. M. A., and El Sayed, N. A. (2019). Thermal conductivity calculation from P-wave velocity and porosity assessment for sandstone reservoir rocks. *Geothermics*, 82, 91-96.
- IEEE (2017). Draft Guide for Thermal Resistivity Measurements of Soils and Backfill Materials, in IEEE P442/D3, July 2017, pp.1-45, 14 July 2017.
- Khandelwal, M., and Singh, T. N. (2009). Correlating static properties of coal measures rocks with P-wa-

- ve velocity. *International Journal of Coal Geology*, 79(1-2), 55-60.
- Kukkonen, I., and Lindberg, A. (1995). Thermal conductivity of rocks at the TVO investigation sites Olkiluoto, Romuvaara and Kivetty. Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Report YJT-95-08, 29.
- Manzella, A. (1999). Geophysical methods in geothermal exploration. Unpublished Lecture notes of International Institute for Geothermal Research, Pisa, Italy.
- Moya, D., Aldás, C., and Kaparaju, P. (2018). Geothermal energy: Power plant technology and direct heat applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 889-901.
- Nieto, I. M., Carrasco García, P., Sáez Blázquez, C., Farfán Martín, A., González-Aguilera, D., and Carrasco García, J. (2020). Geophysical Prospecting for Geothermal Resources in the South of the Duero Basin (Spain). *Energies*, 13(20), 5397.
- Pálmason, G. (1976). Geophysical methods in geothermal exploration. In *Proceedings of the 2nd UN Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources (Vol. 2, pp. 1175-1184)*.
- Rühaak, W., Guadagnini, A., Geiger, S., Bär, K., Gu, Y., Aretz, A., Homuth, S., and Sass, I., (2015). Upscaling thermal conductivities of sedimentary formations for geothermal exploration. *Geothermics* 58, 49-61.
- Sáez Blázquez, C., Carrasco García, P., Nieto, I. M., Maté-González, M. Á., Martín, A. F., and González-Aguilera, D. (2020). Characterizing Geological Heterogeneities for Geothermal Purposes through Combined Geophysical Prospecting Methods. *Remote Sensing*, 12(12), 1948.
- Sáez Blázquez, C., Farfán Martín, A., Martín Nieto, I., and Gonzalez-Aguilera, D. (2017). Measuring of thermal conductivities of soils and rocks to be used in the calculation of a geothermal installation. *Energies*, 10(6), 795.
- Salimzadeh, S., and Nick, H. M. (2019). A coupled model for reactive flow through deformable fractures in enhanced geothermal systems. *Geothermics*, 81, 88-100.
- Sáez Blázquez, C., Martín Nieto, I., Farfán Martín, A., González-Aguilera, D., and Carrasco García, P. (2019). Comparative analysis of different methodologies used to estimate the ground thermal conductivity in low enthalpy geothermal systems. *Energies*, 12(9), 1672.
- Shah, M., Sircar, A., Vaidya, D., Sahajpal, S., Chaudhary, A., and Dhale, S. (2015). Overview of geothermal surface exploration methods. *Int. J. Adv. Res. Innov. Ideas Educ.*, 1(4), 55-64.
- Zeng, Z. F., Chen, X., Li, J., LI, T. L., and Zhang, L. H. (2012). Advancement of geothermal geophysics exploration. *Progress in Geophysics*, 27(1), 168-178.

