

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

**Profesor Patrocinante**

Sr. Ramón Díaz N.

## **DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN MATERIAL DETRÍTICO**



**TATTYANA VÁSQUEZ AGÜERO**

Informe de Memoria de Título

Para optar al Título de

Ingeniera Civil de Minas

---

SEPTIEMBRE 2020

## Agradecimientos

Esta instancia la dedico a agradecer a todos aquellos que me brindaron su apoyo durante el desarrollo de este trabajo de memoria de título, y en mi proceso universitario:

Agradezco en primer lugar a mi familia, padres y hermanos, quienes me brindaron todo lo necesario para llevar a cabo mi etapa universitaria de la mejor forma, tanto emocional como monetariamente. Destaco a mi hermana Valentina, quien vivió todo el proceso universitario junto a mí y siempre confió en mis capacidades. También agradezco a mi colaborador A.C quién me dio todo su apoyo, amor y ánimo en los días de estrés. A los amigos que conocí durante la juventud que siempre estuvieron ahí para sacarme una sonrisa cuando me sentí frustrada, y a los amigos que conocí en la universidad, con los que viví mi etapa universitaria a full, en particular con Carlitos, Gabo, Piry, Barba, y Jesu. Destaco a mi geo-parter Gabriel, con quién compartí el camino de la geotérmia, siendo él quien me instó a abordar este tema, te quiero mucho amigo.

Agradezco además a Ramón, docente patrocinador de esta memoria, quien me introdujo el tópico de energías renovables en minería, y que con su exigencia me instó a cada vez dar lo mejor mí. Muchas gracias por su orientación y paciencia, es un gran docente. También a los trabajadores del Departamento de Ingeniería Metalúrgica, especialmente a Don Edgardo Elorza, instrumentista del DIMET, por su amabilidad y buena voluntad cada vez que fue requerida.

A Juan Reyes, alumno memorista de Ingeniería Civil Metalúrgica de la UdeC, experto en informática y medición de temperatura. No podría agradecer lo suficiente por todo el apoyo y colaboración que me ha brindado durante el desarrollo de esta memoria, siempre estuviste con la mejor disposición a ayudar. Serás un profesional de excelencia, te deseo lo mejor en tu vida y tu carrera profesional. También destaco a Alejandro Vásquez, alumno de doctorado de Ingeniería Civil Metalúrgica de la UdeC, quien colaboró con el proceso de homogeneización de la muestra y realizó su análisis granulométrico, y a Brayán Mora, alumno de ingeniería civil de minas de la Udec, quien colaboró con la puesta en marcha de la experiencia.

Finalmente, al equipo de trabajo de la Unidad de Modelización Hidrogeofísica y de Ensayos No Destructivos de la Universidad de Oviedo, les agradecemos por habernos acogido con tanta amabilidad durante nuestra estadía en España y por haber encausado nuestro trabajo cuando aún estaba en una fase inicial. Además, agradezco en particular a Paulino Fernández, jefe de la unidad, quién nos aceptó con los brazos abiertos en su grupo y nos prestó su licencia de COMSOL Multiphysics® para realizar la simulación numérica del experimento.

## Resumen

El presente documento detalla el desarrollo de un experimento realizado utilizando tecnología de bajo costo, con el objetivo de determinar la conductividad térmica en materiales detríticos.

La configuración experimental consistió en posicionar una bombilla incandescente de 42 vatios a la mitad de un recipiente cilíndrico con material detrítico en su interior, para luego cubrirla con este mismo material. Se conectó la bombilla y el material detrítico se calentó paulatinamente, midiendo las temperaturas del material con sensores dispuestos radialmente a distancias conocidas en el interior de la muestra. Una vez que las temperaturas se estabilizaron, se determinó la conductividad térmica a partir de los datos experimentales de temperatura, haciendo uso del método de determinación de conductividad térmica de materiales detríticos para un régimen estacionario, propuesto por Rey-Ronco et al. (2011).

La medida en tiempo real de temperaturas fue realizada mediante sensores ds18b20, gestionados mediante una placa Arduino, y almacenada en un ordenador portátil. Los datos fueron analizados e interpretados según dos modelos fisicomatemáticos de transferencia de calor por conducción, seleccionados previamente en función de los objetivos propuestos mediante una revisión bibliográfica.

El resultado experimental de conductividad térmica obtenido para el material detrítico (0.465 W/m·K) fue comprobado de forma satisfactoria por dos vías. La primera comprobación se realizó mediante la comparación con valores documentados por diferentes investigadores. En segundo lugar, se realizaron simulaciones numéricas con el software COMSOL Multiphysics®.

Finalmente, se concluyó que la metodología empleada y la instrumentación de bajo costo seleccionada permiten obtener resultados adecuados en la caracterización de la conductividad térmica de materiales no consolidados y pueden ser empleados con ciertas garantías de confiabilidad con un costo de implementación inferior a 52000 CLP.

## Abstract

This document details the development of an experiment carried out using low-cost technology, with the objective of determining the thermal conductivity of a detrital material sample.

The experimental setup consisted of placing a 42 W incandescent bulb in the center of a cylindrical container filled with detrital material inside, and then cover it with the same material. The bulb was turned on and the detrital material was gradually heated, measuring the temperatures with sensors arranged radially at known distances within the sample. Once the temperatures stabilized, the thermal conductivity of the sample was determined using a numerical method proposed by Rey-Ronco et al. (2011).

The real-time measurement of the temperatures was carried out by ds18b20 sensors managed by an Arduino board and stored in a laptop. The data were analyzed and interpreted according to two heat transfer physico-mathematical models of heat transfer by conduction, previously selected by means of a bibliographical review.

The thermal conductivity obtained for the detrital material (0.465 W/m·K) was satisfactorily verified by two means. The first check was made comparing the experimental value with documented values proposed by different researchers. Secondly, numerical simulations were made with COMSOL Multiphysics®.

Finally, it was concluded that the methodology used, and the low-cost instrumentation selected are adequate to determine the thermal conductivity of a detrital material with certain reliability and with an implementation cost less than 52000 CLP.

## Índice de contenidos

1	Introducción.....	1
1.1	Panorama energético actual.....	1
1.2	Geotermia en la industria minera.....	2
1.3	Propiedades térmicas del terreno.....	7
1.4	Hipótesis del trabajo.....	9
1.5	Objetivos de la investigación.....	9
1.5.1	Objetivo general.....	9
1.5.2	Objetivos específicos.....	9
2	Antecedentes fundamentales.....	11
2.1	Energía geotérmica.....	11
2.2	La bomba de calor geotérmica.....	11
2.3	Energía geotérmica de muy baja entalpía en minería.....	13
2.3.1	Reservorios de energía geotérmica de muy baja entalpía en sitios mineros.....	13
2.3.2	Explotación de energía geotérmica de muy baja entalpía en minería.....	14
2.3.3	Usos de energía geotérmica de muy baja entalpía en minería.....	14
2.4	Determinación de la conductividad térmica en material detrítico.....	18
2.4.1	Métodos teóricos.....	18
2.4.1.1	Métodos analíticos.....	19
2.4.1.2	Métodos numéricos.....	19
2.4.2	Métodos experimentales.....	20
2.4.2.1	Métodos de laboratorio.....	20
2.4.2.2	Métodos <i>in situ</i> .....	21
2.5	Fundamentos de transferencia de calor.....	22
2.5.1	Propiedades térmicas.....	23
2.5.2	Modelos de fuentes de calor.....	25
2.5.3	Mecanismos de transferencia de calor.....	26
2.5.3.1	Transferencia de calor por convección.....	26
2.5.3.2	Transferencia de calor por radiación.....	27
2.5.3.3	Transferencia de calor por conducción.....	27
2.5.4	Ecuación fundamental de la conducción de calor.....	27
2.5.5	Ley de Fourier para flujos de calor a través de paredes esféricas.....	31
3	Desarrollo experimental.....	34
3.1	Introducción.....	34
3.2	Diseño y planificación del experimento.....	35

3.3	Materiales utilizados .....	37
3.4	Desarrollo del experimento.....	39
3.4.1	Toma de la muestra .....	39
3.4.2	Preparación de la muestra .....	40
3.4.3	Disposición de la fuente de calor y los sensores de temperatura.....	41
3.4.4	Conexión y programación del sistema de monitoreo .....	42
3.4.5	Toma de datos .....	43
4	Resultados y discusiones .....	45
4.1	Análisis granulométrico .....	45
4.2	Análisis mineralógico.....	46
4.3	Conductividad térmica experimental.....	46
4.4	Simulación numérica del experimento .....	51
5	Conclusiones y recomendaciones .....	59
6	Bibliografía .....	61
7	Anexos .....	70
7.1	Anexo 1: Especificaciones técnicas de los materiales y equipos utilizados en el experimento.....	70
7.2	Anexo 2: Código de medición del experimento (Arduino). .....	73
7.3	Anexo 3: Código de almacenamiento de datos del experimento (Matlab).....	75
7.4	Anexo 4: Código de análisis de datos del experimento (Matlab).....	80

## Índice de tablas

Tabla 1: Diferentes equipos para determinar conductividad térmica de materiales .....	8
Tabla 2: Presupuesto de materiales el para experimento realizado .....	9
Tabla 3: Aplicaciones de energía geotérmica de muy baja entalpía en distintas labores mineras. 16	
Tabla 4: Aplicaciones de energía geotérmica de muy baja entalpía proveniente de minas inactivas en Alemania (Wieber & Pohl, 2008).....	17
Tabla 5: Métodos de determinación de conductividad térmica en rocas y material detrítico .....	20
Tabla 6: Valores de conductividad térmica de materiales comunes a temperatura ambiente (Cengel, 2016).....	25
Tabla 7: Distribución granulométrica de la muestra utilizada.....	45
Tabla 8: Porcentaje mineral y densidad de cada componente presente en la muestra de material detrítico .....	46
Tabla 9: Valores de conductividad térmica $k_u$ y $k_v$ .....	47
Tabla 10: Resultados de las experiencias 1 y 2 para conductividad térmica $k$ . .....	48
Tabla 11: Conductividad teórica $k_{dry}$ en función de la porosidad de la muestra .....	49
Tabla 12: Valores de los parámetros geométricos considerados en el modelo .....	51
Tabla 13: Valores de las propiedades del material consideradas en el modelo.....	51
Tabla 14: Parámetros necesarios para calcular las resistencias térmicas en el sistema .....	54
Tabla 15: Errores relativos para cada temperatura simulada, con respecto a las temperaturas experimentales .....	57
Tabla 16: Especificaciones técnicas de los sensores ds18b20 (Maximintegrated, 2019) .....	70
Tabla 17: Especificaciones técnicas de la placa programable Arduino UNO (Arduino Official Store, 2020).....	70
Tabla 18: Especificaciones técnicas del polietileno (Roca, 2005).....	71

## Índice de figuras

Figura 1: Esquema de clasificación de los métodos de determinación de conductividad térmica. ..	18
Figura 2: Esquema del experimento para material detrítico (vista 3D) .....	36
Figura 3: Esquema del experimento para material detrítico (vista en planta) .....	36
Figura 4: Barril de polietileno de 200 litros cortado a la mitad y graduado en su borde con una cinta métrica .....	37
Figura 5: Lámpara de 42 W de potencia con portalámparas de loza.....	37
Figura 6: Sensor de temperatura ds18b20.....	38
Figura 7: Placa programable Arduino UNO .....	38
Figura 8: Unidad de almacenamiento de datos (ordenador portable).....	39
Figura 9: Zona de obtención de la muestra de material detrítico .....	39
Figura 10: Mapa de la Universidad de Concepción con la ubicación de la zona de muestreo (Cedeus, 2014).....	40
Figura 11: Procedimiento de secado de la muestra .....	40
Figura 12: Procedimiento de homogeneización de la muestra.....	41
Figura 13: Disposición de los sensores y la fuente de calor según el modelo planteado.....	41
Figura 14: Esquema de conexión de los sensores a la placa Arduino.....	42
Figura 15: Gráfico obtenido de la experiencia 1 (°C v/s horas) .....	44
Figura 16: Gráfico obtenido de la experiencia 2 (°C v/s horas) .....	44
Figura 17: Gráfica datos experimentales aplicando la ecuación (32), para determinar la conductividad térmica .....	47
Figura 18: Intervalo de valores bibliográficos de conductividad térmica para suelos arenosos, junto a valor teórico y experimental obtenidos.....	51
Figura 19: Resistencias térmicas en el sistema simulado .....	52
Figura 20: Condiciones de contorno aplicadas al modelo .....	54
Figura 21: Simulación del experimento en COMSOL Multiphysics®.....	55
Figura 22: Corte a la mitad del cilindro, con las respectivas temperaturas para un régimen estacionario.....	56
Figura 23: Comparación de temperatura de sensores en experiencias 1, 2, y simulaciones numéricas.....	56

## Nomenclatura

Letra	Significado o equivalencia	Unidad de medida
$C_p$	Calor específico	J/kg·K
$dt$	Intervalo de tiempo	s
$dx$	Distancia x	m
$dy$	Distancia y	m
$dz$	Distancia z	m
$E$	Energía térmica	J
$h$	Coeficiente convectivo de calor	W/m <sup>2</sup> ·K
$k$	Conductividad térmica	W/m·K
$P$	Potencia	W
$q$	Flux de calor	W/m <sup>2</sup>
$R$	Radio	m
$r$	Resistencia térmica	m <sup>2</sup> ·K/W
$T$	Temperatura	K
$t$	Tiempo	s
$U$	Transmitancia térmica	W/m <sup>2</sup> ·K
$u$	Pendiente	-
$V$	Variación relativa	%
$V_{teórico}$	Valor teórico	-
$V_{experimental}$	Valor experimental	-
$v$	Intersección con eje y	-
$x$	Variable independiente	-
$y$	Variable dependiente	-

Símbolo	Significado o equivalencia	Unidad de medida
$\alpha$	Difusividad térmica	m <sup>2</sup> /s
$\rho$	Densidad	kg/m <sup>3</sup>
$\hat{q}$	Energía generada	W/m <sup>3</sup>
$\frac{dT}{dx}$	Gradiente de temperatura	K/m

Sigla o abreviatura	Significado o equivalencia
CAD	Dólar canadiense
DIMET	Departamento de Ingeniería Metalúrgica
DTRT	Distributed thermal response test
EGMBE	Energía Geotérmica de muy baja entalpía
EMERG	The Earth Mine Energy Research Group
GHP	Guarded hot plate
GMBE	Geotermia de muy baja entalpía
GSHP	Geothermal source heat pump
GWHP	Geothermal Water Heater
MEF	Método de elementos finitos
TRT	Thermal response test

# 1 Introducción

## 1.1 Panorama energético actual

El progreso tecnológico y el desarrollo económico a nivel mundial se ha caracterizado, desde sus inicios, por el uso intensivo de energía (Merino, 2007). En los últimos siglos, este constante proceso de mejoramiento se ha visto marcado fuertemente por la explotación de combustibles fósiles a gran escala (Mata et al., 2012). Durante las últimas décadas, el aumento de la población mundial ha implicado que el consumo de estos combustibles se eleve, estimulando el estrés ambiental de forma notable (Avtar et al., 2019).

En 2018, aproximadamente el 75% de la demanda energética mundial era suplida mediante la explotación de combustibles fósiles (Gielen et al., 2019), contaminantes y finitos, a pesar de que en su utilización se encontraba el origen de una gran parte de las problemáticas medioambientales que afectan al planeta Tierra en la actualidad, tales como el calentamiento global y la escasez de recursos hídricos (Fraga & Martínez-Ageitos, 2007). Concretamente, uno de los principales problemas ambientales atribuidos a la actividad humana durante las últimas décadas del siglo XX y las primeras del XXI, ha sido la emisión de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono, el metano y los óxidos de nitrógeno, gran mayoría de los cuales se generan por la combustión de combustibles fósiles con fines energéticos (Casas, 2020; Fraga & Martínez-Ageitos, 2007). De este modo, el desarrollo de prácticas que permitan reducir la emisión de este tipo de gases se presenta como un desafío para la ciencia e ingeniería modernas.

Además, la demanda de energía eléctrica aumenta rápidamente en todo el mundo (Merino, 2007), mientras que la disponibilidad de combustibles fósiles escasea cada vez más. En 1972, las proyecciones realizadas por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) indicaron que para el año 2100, todos los recursos naturales finitos del planeta se consumirían en su totalidad (Aizpuru, 2003). En este mismo contexto, BP, reconocida entidad de la estadística ambiental, cifró en 40 años la duración de las reservas mundiales de petróleo y en 65 años las de gas natural (BP Statistical Review of World Energy, 2006), suponiendo que la producción y el consumo de estos combustibles fósiles se mantuviera estable hasta su total agotamiento. De este modo, se proyecta que el costo de las fuentes de energía convencionales aumente progresivamente durante la próxima década (Comisión Nacional de Energía, 2016).

En este marco, la energía renovable que se obtiene de fuentes naturales, como la luz del sol, la fuerza del viento, las corrientes marinas o el calor de la tierra, adquiere un papel preponderante en el panorama energético mundial actual.

Una de las principales ventajas que presentan las energías renovables es que estas implican un impacto ambiental negativo menor, por lo que también se denominan energías limpias (Línea Verde, 2018). Su uso en cualquier tipo de industria es beneficioso.

En el sector minero, se ha dependido tradicionalmente de fuentes convencionales de combustibles fósiles para satisfacer su creciente demanda de energía. Actualmente, el acceso a formas de energía confiables, rentables y sostenibles es una prioridad estratégica para el sector minero global y su desarrollo futuro (Ernst & Young, 2014), priorizando la disminución del consumo de recursos no renovables. Las minas han estado sometidas a una presión cada vez mayor para abordar los desafíos modernos, como el alto costo de la energía, los impuestos al carbono y requisitos de emisiones más estrictos. Muchas empresas están explorando constantemente formas de reducir el costo de la energía mediante una mayor eficiencia e incorporando energías renovables en su matriz energética, de este modo, las estrategias de aprovechamiento de energías renovables pasarían a jugar un rol preponderante en el área de la sostenibilidad del sector minero.

Actualmente, este sector productivo se enfrenta a varios retos. La disminución de las leyes de mineral, el aumento de la dureza de las rocas y el envejecimiento de las faenas, entre otros factores que implican un paulatino aumento en la necesidad de consumir agua y energía. A modo de ejemplo, durante el año 2018, en Chile, la minería del cobre utilizó más de medio billón de litros de agua, y se espera que esta cifra se duplique para el año 2030 (Montes y Cantalloppts, 2018). En cuanto al gasto energético, este sector utilizó 21.1 TW·h en 2018, y se prevé que el consumo pueda alcanzar los 35.3 TW·h para el año 2028.

Considerando la proyección de la vida útil de los combustibles fósiles, queda en evidencia la relevancia de incrementar el uso de energías renovables en la industria minera, porque esta requiere un suministro de energía confiable a largo plazo (Boynton et al., 2019).

La energía geotérmica es una fuente renovable de calor que puede proporcionar energía continua, así como también se puede aprovechar mediante aplicaciones de uso directo en climatización y obtención de agua caliente (Jensen, 1983).

## **1.2 Geotermia en la industria minera**

Entre los diversos tipos de energías renovables, la energía geotérmica es aquella que se obtiene mediante el aprovechamiento del calor interno de la Tierra, liberado constante e inagotablemente por esta (Eppelbaum et al., 2014). Al no depender de factores externos, como lo es la variabilidad de las condiciones meteorológicas durante las estaciones del año, este tipo de

energía constituye un recurso que, de ser bien gestionado, puede permitir la obtención de energía limpia de forma continua durante todo el año (Trillo & Angulo, 2008).

Puntualmente, la energía geotérmica de muy baja entalpía (en adelante EGMBE) es aquella que se obtiene de zonas del subsuelo que se encuentran a temperaturas inferiores a 30 °C (Rybach & Stegena, 1979). El empleo de la energía geotérmica de muy baja entalpía es útil y viable en casos muy diversos a escala doméstica (Allen & Milenic, 2003) y en grandes espacios públicos, como centros de atención médica, instituciones educativas y procesos industriales que requieren el uso de calor (Frasheri, 2006).

La energía geotérmica de muy baja entalpía no puede ser utilizada en la generación de electricidad, pero puede ser utilizada para calentar un determinado espacio o para producir agua caliente sanitaria (Blázquez et al., 2016). Una instalación geotérmica para estas finalidades consta de un sistema con bomba de calor geotérmico y un sistema de captación en el terreno. La bomba de calor permite la transferencia de calor de la captación del terreno al usuario (Esen & Yuksel, 2013; Nowak et al., 2000).

Considerando el tema energético en minería, el uso de energía es muy específico de cada sitio ya que depende de la ubicación de la mina, el tipo de recurso mineral en producción y los procesos de extracción y minerales involucrados (Patsa et al., 2015). En general, la energía se compra directamente como electricidad de la red, o como combustible para hacer funcionar equipos de transporte, equipos de procesamiento de minerales, para el control ambiental a través del calentamiento y enfriamiento de agua y aire, en sistemas, tratamiento de relaves y calefacción y/o refrigeración de espacios.

Si se considera que una mina subterránea presenta de forma directa un acceso al calor del subsuelo y que la temperatura aumenta en función de la profundidad (García de la Noceda, 2008), las infraestructuras mineras se ubican en un ambiente idóneo para aprovechar el flujo de calor liberado por la Tierra. Se considera que en la mayor parte de las regiones del planeta, la temperatura de la roca varía entre los 25 °C y los 30 °C, a tan solo 500 m de profundidad (Trillo & Angulo, 2008).

La mayoría de las minas operativas tienen necesidades de calefacción y/o refrigeración dentro de edificios administrativos o campamentos residenciales. Los sistemas de bomba de calor geotérmica (GSHP) tienen el potencial de satisfacer este tipo de necesidad. Los GSHP operan con eficiencias elevadas (300% a 600%) y varían en tamaño desde unidades modulares individuales, utilizadas para habitaciones individuales, hasta unidades del tamaño de un distrito que pueden generar suficiente capacidad para servir a grandes comunidades.

El panorama más amplio es que los sitios mineros activos aprovechen los recursos geotérmicos para proporcionar energía de bajo costo y mejorar la sostenibilidad operativa. Un ejemplo de aplicación de energía geotérmica de muy baja entalpía en minería es Canadá. Solo dentro de este país existen más de 200 instalaciones mineras activas, 55 de las cuales utilizan energía geotérmica. Las minas canadienses pueden obtener ahorros de energía considerables al cambiar sus sistemas de calefacción y refrigeración de espacios por los de GSHP (Koufos, 2012). Un estudio que involucró 12 minas en Manitoba, Ontario y Quebec, representó un ahorro de energía anual total de 20915 kW·h, equivalente a un ahorro económico de 1.5 MCAD/año y una reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> de 18850 toneladas. Los sistemas examinados en el estudio utilizaron agua bombeada desde profundidades entre 800 m y 3.100 m como fuente de calor, con caudales de entre 7 l/s a 63 l/s y temperaturas entre 10 °C y 22 °C.

Otro ejemplo de aplicación de energía geotérmica en minas activas es una planta de generación de energía geotérmica en Veladero Gold Mine en Argentina. En el año 2013, contaban con una capacidad instalada de 8000 kW a 14000 kW utilizando un diseño de planta de energía binaria (aplicación de baja temperatura). Esta planta habría proporcionado entre el 66% y el 100% de los requisitos operativos del sitio activo, pero la falta de información actual lleva a especular que el proyecto nunca llegó a buen término, probablemente debido a influencias económicas externas (Richter, 2013).

Por otro lado, la mina activa más antigua que utiliza energía geotérmica de muy baja entalpía para calefacción es la mina de molibdeno Henderson en Colorado. Esta operación minera utiliza agua a unos 30 °C para calentar el aire de la mina a fin de controlar las temperaturas de trabajo y evitar que el equipo se congele en el clima frío de Colorado. (Jensen, 1983).

Las actividades mineras también pueden utilizar salmueras geotérmicas para la extracción directa de minerales si están en forma de salmueras concentradas. Este método de extracción tiene el potencial de ser más lucrativo para ciertos metales, como el litio, que la extracción de rocas convencional. Además, los fluidos geotérmicos se pueden utilizar para operar plantas de desalinización que serán más importantes a medida que la escasez de agua se vuelva cada vez más común en todo el mundo. Dado que la mayoría de las operaciones mineras requieren grandes volúmenes de agua, las instalaciones de desalinización podrían ser necesarias o incluso exigidas por algunos gobiernos en un futuro próximo. Los procesos de desalinización geotérmica suelen utilizar fluidos de 55 °C a 99 °C para destilar térmicamente el agua de mar (Patsa et al., 2015).

Por otro lado, en el ámbito económico, la reducción de costos y riesgos son las principales prioridades para cualquier operación minera y las empresas mineras están analizando las opciones

de energías renovables alternativas en un esfuerzo por alejarse de una dependencia total de los combustibles fósiles (Patsa et al., 2015). En este ámbito, la energía geotérmica ofrece múltiples ventajas adicionales, como son huella ambiental muy baja en términos de uso de la tierra y emisiones de GEI, y la capacidad de generar energía continua (teniendo en cuenta su tasa de renovación natural), una característica de particular importancia para operaciones mineras que funcionan las 24 horas (Kagel & Gawell, 2005; Li et al., 2015).

Considerando que el principal costo de un sistema de aprovechamiento geotérmico está asociado a la realización de la perforación requerida para alcanzar una profundidad adecuada (MacLean et al., 2018), la instalación de un sistema de bomba de calor geotérmica dentro de una mina conllevaría una inversión inicial menor que en la mayoría de los casos, si se utilizan las infraestructuras mineras preexistentes.

Además, la adición de calor a procesos minerales específicos puede mejorar significativamente los rendimientos y la eficiencia de producción. Por el contrario, el flujo de calor excesivo en las galerías de minas subterráneas ubicadas en áreas de gradientes de temperatura altos constituye un peligro para la seguridad de los trabajadores de la mina, y debe enfriarse y ventilarse continuamente, lo que supone un costo operativo alto (Patsa et al., 2015). En este sentido, considerando la recuperación de calor de procesos como una oportunidad para generar valor agregado, el recuperar calor, por ejemplo, el calor proveniente del aire de ventilación sería valioso si este calor se puede reutilizar, lo que permite transformar un problema en una oportunidad, de esta forma se podrían reducir los costos de una operación minera.

Para una mina con acceso a recursos geotérmicos de baja temperatura, la recuperación de calor residual puede suponer una reducción de costos, además de implicar una disminución en la utilización de combustibles convencionales (McLellan et al., 2012), contribuyendo a aminorar la huella de carbono. Además, tras el cierre de la mina, la infraestructura de energía geotérmica existente se puede utilizar para suministrar energía o calor a las comunidades cercanas como un flujo de efectivo adicional posterior a la mina.

A pesar de las ventajas que presenta el uso de un sistema de bomba de calor geotérmica en minería, este aún no se ha masificado y la explicación de esta falta de uso geotérmico dentro de la industria minera en sitios activos no es muy clara (Boynton et al., 2019). Se entiende que el principal factor es el costo asociado con esta forma de energía, ya que requiere de una gran inversión de capital inicial en infraestructura. En el caso de Chile donde el uso de energía geotérmica todavía es incipiente, prácticamente todos los insumos a utilizar son importados. Además, dentro de los costos de implementación, se puede distinguir que existen aquellos asociados a materiales, mano de obra

especializada y perforación, siendo este último el más significativo y relevante, el cual se estima actualmente en aproximadamente 300 USD/m (Sharqawy et al., 2009). En este sentido, uno de los beneficios de las operaciones mineras es que ya se están realizando trabajos relacionados con la perforación (un requisito previo para cualquier operación minera). Desde el punto de vista operativo, una vez que se realiza la inversión inicial, el costo de la EGMBE es menor que el de los combustibles fósiles convencionales, especialmente en lugares remotos donde la logística de suministro de combustible es complicada y costosa (Boynnton et al., 2019).

Otro problema particular relacionado con los sistemas geotérmicos en minería es que el agua bombeada desde la mina puede tener una composición química compleja, lo que resulta en condiciones de corrosión agresivas, riesgo de precipitación química o liberación de gases peligrosos. Esto se debe a que se pueden formar incrustaciones de carbonato de calcio en los intercambiadores de calor y reducir su rendimiento cuando la concentración de  $\text{CaCO}_3$  en el agua supera las 100 ppm y el pH es superior a 7.5. La presencia de  $\text{Fe}^{2+}$  en una concentración suficiente también puede causar incrustaciones en el intercambiador de calor de la bomba de calor cuando el agua del sistema se expone al aire. Además, los intercambiadores de calor de la bomba de calor geotérmica están hechos comúnmente de cobre o cuproníquel y pueden dañarse cuando la concentración de  $\text{H}_2\text{S}$  excede 0.25 ppm (Raymond & Therrien, 2007).

Estos problemas se pueden mitigar mediante un diseño de ingeniería apropiado, como el uso de un circuito de agua secundario para reducir la cantidad de equipo expuesto al agua subterránea agresiva, lo que puede permitir que el agua subterránea bombeada permanezca presurizada, reduciendo así el riesgo de desgasificación, precipitación química y obstrucción. A través del circuito secundario circularía agua limpia y el equipo conectado al circuito se puede diseñar para condiciones químicas menos agresivas, ahorrando costos de capital (Preene & Younger, 2014).

En Chile además, una de las razones de porque no se utiliza la energía geotérmica, radica en que el desarrollo de la industria geotérmica en Chile comienza apenas el año 2018, con la formación de la denominada “Mesa de Geotermia” por parte del Ministerio de Energía (Ministerio de Energía, 2018), por lo que no muchas empresas de energía han abordado este mercado.

Teniendo en cuenta la posible aplicación de sistema de bomba de calor geotérmica en proyectos de gran envergadura, un aspecto importante a tener en cuenta es la realización de estudios adecuados del terreno que permiten llevar a cabo el proyecto y evaluar adecuadamente la capacidad de extracción e inyección de calor (Rybach & Signorelli, 2010; Signorelli et al., 2007). La definición de un diseño adecuado es muy importante para evitar errores de dimensionamiento que condicionen la eficiencia y sustentabilidad a largo plazo de los sistemas, requiriendo para este fin,

de información de las propiedades térmicas del suelo y de la demanda de energía del edificio (Gehlin, 2002).

### **1.3 Propiedades térmicas del terreno**

Para implementar un sistema de captación de energía geotérmica, es necesario conocer las propiedades térmicas del terreno. La capacidad de caracterizar estas propiedades tiene gran relevancia en los proyectos de diseño y construcción de instalaciones de aprovechamiento geotérmico de muy baja entalpía (Saito et al., 2014). Conocer las propiedades térmicas de terreno permite determinar su capacidad de intercambio de calor y, por tanto, la capacidad de captación energética de la instalación (Fernández et al., 2013).

La conducción es el principal mecanismo de propagación térmica que interviene en el proceso de intercambio térmico en una instalación geotérmica de muy baja entalpía (Leach, 1993). Por tanto, el parámetro más relevante es la conductividad térmica del terreno, coeficiente que determina la capacidad de un material para conducir calor (Nope & de Santiago, 2014).

Es importante mencionar que un diseño apropiado del sistema de bomba de calor geotérmica es fundamental, no solo para el buen rendimiento a corto y largo plazo de estos sistemas, sino también para no sobreestimar la longitud del sondaje, responsable de parte importante del costo inicial. El subdimensionamiento de este último es aún peor, ya que perjudicaría el buen desempeño de las bombas de calor (Lamarche et al., 2010). En este sentido, las propiedades térmicas de las unidades geológicas del subsuelo determinan las dimensiones de los sondajes necesarios.

En el caso de proyectos de una vivienda es suficiente estimar los valores de las propiedades térmicas con base en la experiencia en proyectos similares. Sin embargo, para proyectos más grandes, como sería un sistema de bomba de calor geotérmica en una mina, las propiedades térmicas del subsuelo determinan el número de sondajes necesarios para abastecer las necesidades energéticas de una edificación determinada y, en consecuencia, fijan los costos involucrados, y aquí radica la importancia del conocimiento de las propiedades térmicas, en concreto la conductividad térmica del terreno.

Según Sanner et al. (2009), la sobreestimación en el valor de conductividad térmica podría producir que el coeficiente de rendimiento de la bomba de calor disminuya, los costos operativos aumenten (debido a un consumo excesivo de energía eléctrica), y que los sistemas experimenten un posible deterioro. Por otro lado, una subestimación de la conductividad térmica podría incurrir en un diseño con largo de sondaje mayor de lo necesario, y así, mayores costos de inversión.

Por tanto, conocer la conductividad térmica del terreno en donde se emplace el sistema de captación geotérmica, constituye un dato importante para el diseño de sistemas de captación geotérmica en el terreno (Blázquez et al., 2017). Por estas razones, es necesario definir este parámetro para realizar un cálculo adecuado de una instalación geotérmica de baja entalpía (Balbay & Esen, 2010, 2013). Sin embargo, los equipos disponibles en el mercado para determinar la conductividad térmica en materiales son de costo elevado.

En la Tabla 1 se muestra una recopilación realizada considerando valores FOB de equipos que se encuentran actualmente en el mercado, estos valores no incluyen costos de transporte al país de destino, ni costos de aduanas.

**Tabla 1: Diferentes equipos para determinar conductividad térmica de materiales.**

Equipo	Valor (USD)	Página web
TBTTCDR-1 Thermal Conductivity Testing Machine	8000	<a href="https://t-bota.en.made-in-china.com/product/cKAJoMVvkNWS/China-TBTTCDR-1-Thermal-Conductivity-Testing-Machine.html">https://t-bota.en.made-in-china.com/product/cKAJoMVvkNWS/China-TBTTCDR-1-Thermal-Conductivity-Testing-Machine.html</a>
EIE Thermal Conductivity Apparatus for Aac Blocks	8000 - 12000	<a href="https://alibaba.com/product-detail/Thermal-Conductivity-Apparatus-For-AacBlocks_50008322757.html">https://alibaba.com/product-detail/Thermal-Conductivity-Apparatus-For-AacBlocks_50008322757.html</a>
CD-DR3030 Heat Flow Meter, Thermal Conductivity Tester	7500 - 8000	<a href="https://cheerjazz.en.made-in-china.com/product/qMgEybfANjtY/China-Heat-Flow-Meter-Thermal-Conductivity-Tester.html">https://cheerjazz.en.made-in-china.com/product/qMgEybfANjtY/China-Heat-Flow-Meter-Thermal-Conductivity-Tester.html</a>
SSX-DR300 Heat flow meter and thermal conductivity measurement tester	5500 - 6500	<a href="https://cheerjazz.en.made-in-china.com/product/LBQmvcydrFWt/China-Heat-Flow-Meter.html">https://cheerjazz.en.made-in-china.com/product/LBQmvcydrFWt/China-Heat-Flow-Meter.html</a>
Thermal Conductivity Kit + Keithley 2401 Source Measure Unit	11295	<a href="https://thermalconductivitykit.com/">https://thermalconductivitykit.com/</a>

Por otro lado, en la Tabla 2 se muestra los valores de todos los materiales que fue necesario adquirir para la realización del presente experimento. De aquí se desprende que para llevar a cabo el experimento se necesitaron 51799 CLP.

**Tabla 2: Presupuesto de materiales el para experimento realizado**

Ítem	Descripción	Valor unidad (CLP)	Unidades	Valor total (CLP)
1	Ampolleta Halógena 42W	990	1	990
2	Porta ampolleta cerámica	890	1	890
3	Sensor digital DS18B20	4000	9	36000
4	Placa programable Arduino	9995	1	9995
5	Protoboard Arduino	534	1	534
6	Pack 40 cables Macho/Hembra	2490	1	2490
7	Resistencia 4.7 K ohms	100	9	900
<b>TOTAL</b>				<b>51799</b>

#### 1.4 Hipótesis del trabajo

Las dificultades que plantea el estudio de las propiedades térmicas del terreno son una barrera para el desarrollo de la energía geotérmica de muy baja entalpía en minería e impiden que esta juegue un rol más activo en la matriz energética de la industria.

En este trabajo se plantea que el desarrollo de un método experimental de bajo costo para determinar de la conductividad térmica de muestras fáciles de obtener en una operación minera, como son las muestras de material detrítico o los rípios de perforación, permitiría un rol más activo de la energía geotérmica de muy baja entalpía en la matriz energética del sector minero, en particular para pequeña y mediana minería.

#### 1.5 Objetivos de la investigación

##### 1.5.1 Objetivo general

El objetivo principal de esta memoria de título es diseñar e implementar un dispositivo que permita la determinación de la conductividad térmica de materiales detríticos a bajo costo.

##### 1.5.2 Objetivos específicos

Para llevar a cabo el objetivo general propuesto, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar los distintos métodos experimentales preexistentes para la determinación de la conductividad térmica en materiales detríticos, y determinar el método más adecuado para luego aplicar en este trabajo.

2. Diseñar un dispositivo viable a escala de laboratorio para determinar la conductividad térmica en materiales detríticos, y realizar pruebas a escala de laboratorio.
3. Realizar pruebas de análisis complementarias para caracterizar el material de estudio.
4. Elaborar un modelo fisicomatemático que describa el fenómeno de transferencia de calor por conducción en muestras de material detrítico y simularlo numéricamente empleando un software comercial.



## **2 Antecedentes fundamentales**

### **2.1 Energía geotérmica**

La energía geotérmica es la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie sólida de la Tierra. Esta definición oficial de la norma alemana (VDI 4640) ha sido adoptada por el Consejo Europeo de Energía Geotérmica (EGEC) e indica que la energía geotérmica engloba el calor almacenado en rocas, suelos y aguas subterráneas, cualquiera que sea su temperatura, profundidad y procedencia. El calor se lleva a la superficie cercana por conducción térmica y por la intrusión en la corteza terrestre de magma fundido que se origina a gran profundidad (Pahud, 2002).

La energía geotérmica se clasifica en cuatro grupos principales según su entalpía o temperatura (Trillo & Angulo, 2008):

1. Energía geotérmica de alta entalpía: temperatura superior a 150 °C. Se utiliza, principalmente, para la generación de electricidad.
2. Energía geotérmica de media entalpía: temperatura varía entre los 70 °C y los 150 °C. Presenta diversos usos, entre los que destacan los sistemas de calefacción, procesamiento de papel y secado de madera.
3. Energía geotérmica de baja entalpía: temperatura varía entre los 70 °C y los 30 °C. Se utiliza principalmente en sistemas de calefacción.
4. Energía geotérmica de muy baja entalpía: temperatura inferior a 30 °C. Se utiliza exclusivamente en sistemas de calefacción y obtención de agua caliente sanitaria mediante el uso de la tecnología de la bomba de calor geotérmica.

El tipo de energía geotérmica relevante para este estudio es la de muy baja entalpía, puesto que es la que se encuentra en una mina subterránea (García de la Noceda, 2008) y sus usos principales son la obtención de agua caliente sanitaria o la climatización de espacios. De este modo, los capítulos dispuestos a continuación se centran en los mecanismos y procesos relacionados a este tipo de energía.

### **2.2 La bomba de calor geotérmica**

El presente trabajo no se centra en los sistemas de aprovechamiento geotérmico, pero es necesario definir y explicar lo que es la bomba de calor geotérmica para realizar una justificación adecuada del tema abordado.

Una bomba de calor geotérmica o una bomba de calor de fuente subterránea es un sistema de calefacción y/o enfriamiento que transfiere calor hacia o desde el suelo.

Las bombas de calor pueden proporcionar calor de manera eficiente y económica con bajas emisiones (Chua et al., 2010). El concepto de bombas de calor ha sido reconocido desde el siglo XIX y las aplicaciones comerciales existen desde hace unos 60 años. Las bombas de calor permiten transferir la energía térmica de un medio de menor a otro de mayor temperatura (Ozyurt & Ekinci, 2011).

Los sistemas de aprovechamiento de energía geotérmica de muy baja entalpía están compuestos por tres partes principales (Y. Bi et al., 2009); la bomba de calor geotérmica, la conexión a tierra, que facilita la extracción de calor del terreno a través de un intercambiador de calor, y el sistema de distribución de calor final, que permite climatizar un espacio u obtener agua caliente sanitaria (RETSscreen International, 2005).

La bomba de calor geotérmica está constituida por un circuito cerrado en el que están involucrados cuatro componentes principales: evaporador, condensador, compresor y válvula de expansión. También hay otros componentes y accesorios menores como ventiladores, tuberías y controles que ayudan en la operación.

Las bombas de calor geotérmica utilizadas para calefacción funcionan de la siguiente manera (RETSscreen International, 2005):

1. La energía térmica se extrae de la tierra y se transporta al evaporador.
2. Dentro de la unidad de bomba de calor, el refrigerante frío, en estado líquido, ingresa al evaporador. El calor procedente del terreno se transfiere de la conexión a tierra al refrigerante en el evaporador y hace que el refrigerante se convierta en un vapor de baja presión.
3. El vapor ingresa a un compresor accionado eléctricamente, donde la presión del fluido aumenta y resulta en un vapor de alta temperatura y presión.
4. El vapor de alta temperatura ingresa al condensador, donde se produce la transferencia de calor del refrigerante al sistema de distribución de calor. El refrigerante se enfría por la cesión de calor y condensa, produciendo un líquido a alta presión, pero con menor temperatura.
5. El fluido pasa a través de una válvula de expansión que reduce su presión y permite su cambio a fase gaseosa nuevamente, ingresando al evaporador para comenzar otro ciclo.

Por otro lado, algunas bombas de calor geotérmicas pueden funcionar también en modo de refrigeración, realizando la transferencia de calor a la inversa.

La eficiencia energética de la bomba de calor geotérmica se expresa mediante la relación entre energía final disponible y la entrada de energía al compresor. El término coeficiente de rendimiento (COP) se utiliza para definir la relación entre la energía térmica final y la energía consumida en el proceso (Mustafa Omer, 2008). Los COP de las bombas de calor geotérmicas suelen variar entre 3 y 6, y el valor depende de las configuraciones de conexión a tierra, el tamaño del sistema, las características del terreno, las características del sistema de distribución o aprovechamiento final de la energía y el clima de la zona donde se implemente la instalación, entre otros (Curtis et al., 2005).

## **2.3 Energía geotérmica de muy baja entalpía en minería**

La energía geotérmica es atractiva para la industria minera por su fácil acceso al terreno, principalmente en el entorno de una mina subterránea (Raymond & Therrien, 2007). Además, esta energía es renovable, aunque para que se considere sostenible su explotación, la tasa de extracción de calor por los sistemas de captación debe limitarse a tasas que no superen la tasa de renovación natural.

### **2.3.1 Reservorios de energía geotérmica de muy baja entalpía en sitios mineros**

Los sitios mineros pueden tener acceso de varias formas a esta energía. Cada tipo de fuente tendrá diferentes características. En este sentido, poder comprender las características de la fuente es vital para implementar con éxito los sistemas de bomba de calor geotérmico. Las principales fuentes de energía terrestre en sitios mineros según La Touche & Preene (2011) y Raymond & Gosselin (2007) son:

1. Suelo natural: es la fuente de energía más comúnmente explotada por los sistemas de energía terrestre.
2. Acuíferos y agua de drenaje: los acuíferos forman depósitos de energía geotérmica de baja entalpía que a menudo necesitan ser deshidratados en entornos mineros activos. Los tajos abiertos y las minas subterráneas bajo la influencia de un acuífero pueden experimentar una tasa constante de entrada de agua. Esta agua debe bombearse fuera de la mina para mantener secas las excavaciones. Un sistema de bomba de calor geotérmica podría aprovechar este recurso y extraer o devolver calor al agua subterránea bombeada.
3. Desechos mineros: los vertederos de residuos mineros masivos forman grandes pilas de sedimentos no consolidados que almacenan el calor transferido por las radiaciones solares, el aire, el flujo de agua subterránea y el flujo de calor natural de la tierra. Además, la oxidación de los minerales presentes en los desechos de las minas que contienen sulfuros puede proporcionar una fuente de calor adicional por reacciones químicas exotérmicas. La

caracterización y modelización del drenaje ácido de las minas ha demostrado que la oxidación de sulfuros produce suficiente energía térmica para calentar las rocas de desecho (Lefebvre et al., 2001).

### **2.3.2 Explotación de energía geotérmica de muy baja entalpía en minería**

Teniendo en cuenta las diferentes fuentes de calor identificadas en la bibliografía por autores como La Touche & Preene (2011), la energía geotérmica de muy baja entalpía en una mina es explotable si se cumple con las siguientes condiciones:

1. Demanda energética: se identifican usos finales del calor que se puede extraer de una mina.
2. Demanda compatible con los sistemas de aprovechamiento: la bomba de calor geotérmica no puede generar calor de manera eficiente a temperaturas muy altas. Estos sistemas operan de manera más eficiente cuando proporcionan agua caliente hasta 35 °C de temperatura. Por tanto, estos sistemas generalmente son viables cuando las demandas de calor no superan esta temperatura.
3. Proximidad a la fuente: si la demanda de calor y la fuente de energía están separadas por más de unos cientos de metros la viabilidad económica puede verse comprometida.

### **2.3.3 Usos de energía geotérmica de muy baja entalpía en minería**

El uso de tecnologías geotérmicas está bien establecido fuera de la industria minera y se utiliza cada vez más para calentar y/ o enfriar propiedades residenciales y comerciales. Sin embargo, hasta la fecha se han visto relativamente pocas aplicaciones para extraer calor de minas activas (Preene & Younger, 2014).

Desafortunadamente, si bien el costo unitario por kilovatio hora generado (kW·h) puede ser significativamente menor que el de las fuentes de energía tradicionales, como son los combustibles fósiles, un sistema geotérmico generalmente requiere un costo de capital inicial significativo. Este gasto de capital es necesario antes de que se pueda generar un solo kW·h de energía y es un factor clave por el cual los sistemas geotérmicos no se han implementado en una gama más amplia de entornos y organizaciones en la actualidad (Preene & Younger, 2014).

En el caso de la industria minera, gran parte de la infraestructura minera existente tiene el potencial de adaptarse para permitir la extracción de energía térmica útil. La industria minera de manera rutinaria construye estructuras importantes que penetran el subsuelo (rajos abiertos y caminos subterráneos) y bombea agua subterránea como parte habitual de las operaciones de drenaje. De esta manera, una oportunidad que se presenta es utilizar estas estructuras asociadas con los sitios mineros, donde los costos de capital y operativos ya están comprometidos, pues se

pueden usar los pozos ya perforados, para así aprovechar la energía geotérmica de muy baja entalpía. Según Attilin (2010), está aún no es una práctica común, pero la utilidad de esta energía se investiga teóricamente para su aplicación en minas activas, obteniendo resultados positivos, como en el caso de Renström Mine, Suecia.

En operaciones mineras, la energía geotérmica de muy baja entalpía se podría aprovechar desde la fase de exploración. La perforación es el medio más eficaz de proporcionar una justificación inicial para una revisión integral de los recursos en un sitio potencial, por tanto, las empresas podrían aprovechar la geotermia energía durante la fase de exploración (Patsa et al., 2015).

En países como Canadá, además de las 12 minas en Manitoba que utilizaban energía geotérmica de muy baja entalpía para calefacción, otras operaciones mineras están siendo estudiadas por el Grupo de Investigación de Energía Minera de la Tierra (EMERG) de la Universidad McGill, para determinar la factibilidad de la implementación de un sistema de aprovechamiento geotérmico en sus labores (Raymond et al., 2008). Un ejemplo son las minas de diamante del área de Lac de Gras, en el noroeste del país. Esta zona, conocida como el tercer mayor productor de diamantes del mundo, alberga tres minas activas (Jericó, Ekati y Diavik) y dos proyectos mineros que se prevé desarrollar (Gahcho Kue y Snap Lake). Estas operaciones mineras se llevan a cabo tanto superficial como subterráneamente. La gran afluencia de agua en estas rocas ígneas fracturadas debe manejarse adecuadamente en las excavaciones. En concreto, en la mina subterránea Diavik, el agua se bombea a una tasa promedio igual a  $0.423 \text{ m}^3/\text{s}$  y la tasa de extracción de energía sostenible se estimó en 765 kW, suponiendo la temperatura del agua bombeada a  $6.7 \text{ }^\circ\text{C}$ . El agua bombeada podría gestionarse adecuadamente para proporcionar calefacción geotérmica para las infraestructuras operativas en la mina.

Por otro lado, las minas de níquel y cobre de Sudbury en Ontario, también han sido seleccionadas por EMERG para realizar estudios geotérmicos. Una de las seis minas en esta región tiene una profundidad de más de 1200 m, una ubicación potencial para un desarrollo geotérmico. Se supone que la temperatura en la parte más profunda de la mina es igual a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . El agua de desagüe de la mina podría usarse mediante un sistema de bomba de calor geotérmica para calentar la infraestructura de la mina y los hogares de las comunidades de Sudbury, que tienen una población total de 160000 residentes.

La mina activa más antigua que utiliza energía geotérmica de baja entalpía para calefacción es la mina de molibdeno Henderson en Colorado, Estados Unidos. Esta mina utiliza agua a unos  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  para calentar el aire de la mina a fin de controlar las temperaturas de trabajo y evitar el congelamiento de los distintos equipos mineros en el clima frío de Colorado. La calefacción

geotérmica permite un aumento de la temperatura del aire de 9.4 °C, proporcionando 5900 kW de energía (Jensen, 1983).

En Europa del Este hay ejemplos como la mina de lignito Novaky-Kos en Eslovaquia, que utiliza energía geotérmica de muy baja entalpía para calentar los vestidores de los mineros y calentar el aire en la mina (Lund & Boyd, 2016). De igual forma, como se comprueba en Bátaapáti, región de Hungría que presenta muy bajas temperaturas, la utilización del calor del subsuelo puede prevenir el congelamiento de las rampas por las que circulan los equipos mineros (Toth, 2011), resultando así en una gran mejora de las condiciones de trabajo y de seguridad para operarios y equipos en zonas de temperaturas bajo cero.

También se identificó el uso de la energía geotérmica de baja entalpía en el procesamiento de minerales, en concreto, en la lixiviación en pilas de cianuro para minerales de oro y plata de baja ley. Muchas de las minas que utilizan este método de procesamiento están ubicadas en áreas remotas e inaccesibles, por tanto, deben detener sus labores en temporadas de frío extremo o lluvias. En particular, algunas minas en operación en Nevada, Estados Unidos, cuentan con recursos geotérmicos adecuados para su uso en operaciones de lixiviación en pilas de cianuro. De esta manera, se pueden usar recursos geotérmicos de muy baja entalpía a moderada entalpía para calentar el circuito de cianuro, proporcionando un método de bajo costo para mantener la operación durante condiciones de congelación (Flynn et al., 1995).

Un último uso identificado de la energía geotérmica de muy baja entalpía en minas activas, que puede ser de gran utilidad en países en los que el precio de la electricidad es elevado, es el calentamiento del agua para uso sanitario dentro de la mina. La mina Blagodatna, de la empresa DTEK Pavlogradugol, situada en Ucrania, utiliza los 200 m<sup>3</sup>/h de agua a 17 °C que drena durante todo el año para calentar el agua de uso sanitario, obteniendo 266 kW de los 798 kW requeridos en este proceso, ahorrando así un tercio del capital requerido y pagando la inversión de la bomba de calor en tan solo 3.2 años.

A continuación, en la Tabla 3 se muestra un resumen de los distintos casos que se expusieron, donde se utiliza energía geotérmica de muy baja entalpía.

**Tabla 3: Aplicaciones de energía geotérmica de muy baja entalpía en distintas labores mineras.**

Mina	Aplicación geotérmica	Referencias
Minas de Quebec, Canadá	Calefacción y refrigeración de distintos espacios dentro de la mina	(Koufos, 2012)

Henderson, EE.UU.	Calefacción de labores para evitar congelamiento en los caminos	(Jensen, 1983)
Novaky-Kos, Eslovaquia	Calefacción de los vestidores de los mineros y del aire en la mina	(Lund & Boyd, 2016)
Bátaapáti, Hungría	Calefacción para evitar congelamiento de rampas	(Toth, 2011)
Blagodatna, Ucrania	Calentamiento de agua sanitaria	(Patsa et al., 2015)
Minas de Nevada, EE.UU	Calentamiento del circuito de lixiviación con cianuro para evitar congelación	(Flynn et al., 1995).
Renström Mine, Suecia	Ventilación en la mina	(Attlin, 2010)

Por último, una fuente importante de aprovechamiento de energía geotérmica se encuentra en minas inactivas, hay más de 20 instalaciones en funcionamiento en todo el mundo, donde las infraestructuras mineras subterráneas abandonadas inundadas contemplan en su plan de cierre su reutilización como grandes almacenes de energía subterránea, proporcionando una alternativa viable y sustentable que permite convertir un pasivo minero en un activo (Díaz-Noriega et al., 2020).

En este sentido, el programa de Heerlen (Holanda) merece atención porque muestra cómo, al luchar con la crisis social y económica después del cierre de la mina, la ciudad logró transformarse con éxito, utilizando el sistema de calefacción y refrigeración de la mina, donde se creó un nodo de energía sostenible (Verhoeven et al., 2014). El proyecto Heerlen es un buen ejemplo de implementación de una política de minería socialmente responsable, asociada por un lado al cierre de minas, y al mismo tiempo darles una segunda vida con la implicación y aceptación de la comunidad local. Otro ejemplo es lo ocurrido en Alemania, donde se utiliza la energía geotérmica de minas inactivas de la región de Rhenish Massif para distintas aplicaciones, como son la calefacción de escuelas, un hogar de ancianos y un spa recreacional (Wieber & Pohl, 2008), las que se exponen en la Tabla 4.

**Tabla 4: Aplicaciones de energía geotérmica de muy baja entalpía proveniente de minas inactivas en Alemania (Wieber & Pohl, 2008).**

Mina	Aplicación geotérmica
Mine Heinrich	Calefacción de un hogar de ancianos
Mine Zollverein	Calefacción de una escuela
Shaft 302	Spa recreacional
Tin mine	Calefacción de una escuela

## 2.4 Determinación de la conductividad térmica en material detrítico

Para estimar el potencial geotérmico de una mina, es preciso conocer las propiedades de los materiales geológicos involucrados en la operación minera. Principalmente, la conductividad térmica, y la capacidad térmica volumétrica (*Thermal Properties 9.1, 2011*), destacando entre ellas la conductividad térmica como el parámetro fundamental.

Existen múltiples formas documentadas para determinar la conductividad térmica de material detrítico, mediante métodos teóricos o experimentales (Abuel-Naga & Bergado, 2005; Yan et al., 2019; Progelhof et al., 1976).

Los métodos experimentales se dividen en dos subgrupos; los métodos *in situ*, y los métodos de laboratorio. A su vez, los métodos de laboratorio se clasifican en métodos de régimen estacionario y transitorio, como se presenta en el diagrama adjunto a continuación (Figura 1).

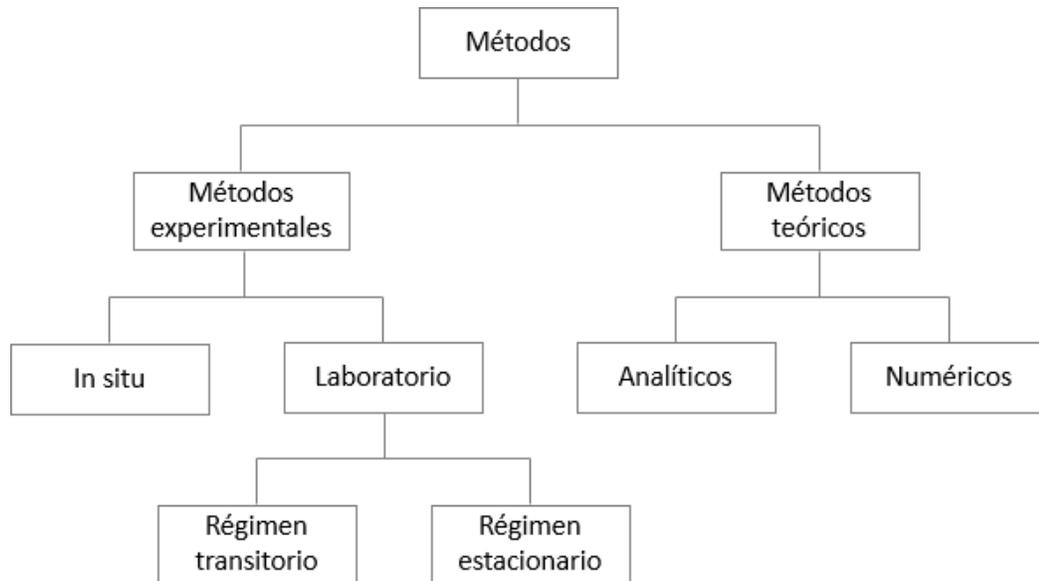


Figura 1: Esquema de clasificación de los métodos de determinación de conductividad térmica.

### 2.4.1 Métodos teóricos

Estos métodos se dividen en métodos analíticos y métodos numéricos (Farouki, 1981; Progelhof et al., 1976) y consideran los mecanismos de transferencia de calor en conjunto con el flujo de agua en el terreno y el medio ambiente (Wullschleger et al., 1991). Además, pueden adaptarse a diferentes ubicaciones, tipologías de terreno y condiciones ambientales (Naranjo-Mendoza et al., 2018).

### **2.4.1.1 Métodos analíticos**

En el caso de los métodos analíticos, estos se basan en una serie de fórmulas bien definidas, ordenadas y finitas, de modo que, al aplicarse a un problema en particular, como la determinación de la conductividad térmica de materiales, siempre se llega a un resultado, aplicando ciertos conocimientos relacionados con el área.

En general, modelos analíticos como el de de Vries (1963), idealizan un sistema de fase múltiple y establecen fórmulas determinísticas mediante análisis físicos y matemáticos para un volumen elemental representativo (Yan et al., 2019), pudiendo llegar a valores de conductividad térmica aproximados. Sin embargo, el establecimiento de modelos teóricos para la determinación de la conductividad en el subsuelo es un desafío, debido a que en ellos se presentan muchos factores mutuamente interrelacionados, como por ejemplo la composición de las partículas minerales, su forma y tamaño, sus fracciones volumétricas en cada fase, su densidad aparente, su porosidad y su contenido de humedad, materia orgánica y variaciones de temperatura (de Vries & Peck, 1958; He et al., 2017; Lu et al., 2014).

Según Johansen (1975), las investigaciones teóricas mostraron que se puede esperar que los métodos puramente analíticos solo funcionen para materiales saturados en los que las conductividades de los componentes del suelo difieren poco entre sí, debido a que, para materiales parcialmente saturados, la presencia de aire con baja conductividad térmica da como resultado una alta sensibilidad a las diferencias en la microestructura dentro del sistema. Dado que estas propiedades son difíciles de incorporar en un modelo matemático para la conductividad térmica, en estos casos se debe recurrir siempre a un enfoque experimental.

### **2.4.1.2 Métodos numéricos**

Los métodos numéricos son una aplicación de algoritmos mediante los cuales es posible formular y resolver problemas matemáticos usando operaciones aritméticas. Estos métodos proporcionan una herramienta para describir procesos físicos y predecir su comportamiento en condiciones variadas. Se están desarrollando, probando y utilizando cada vez más herramientas de simulación numérica que permiten obtener resultados con garantías de predicción en problemas complejos, utilizando datos auxiliares (Rafique, 2015).

Para poder llevar a cabo la simulación numérica es necesario previamente realizar un modelo conceptual que represente el problema. Así, para resolver cada problema habrá que establecer en este caso las hipótesis de simplificación que describen la física del sistema definido en el cuerpo o material sobre el que se define el modelo, las características geométricas del cuerpo en el que tiene

lugar la transferencia de calor, las propiedades físicas del material que constituye el cuerpo, la distribución inicial de temperaturas en el cuerpo, y las condiciones de contorno que describen las interacciones del cuerpo con el medio externo.

Una de las herramientas más utilizadas en el ámbito de la simulación numérica es el software COMSOL Multiphysics®, basado en el método de los elementos finitos (MEF), que permite la resolución de problemas de aplicaciones físicas y de ingeniería.

Este método numérico resuelve de manera iterativa aproximada las ecuaciones diferenciales de gobierno de un sistema continuo, discretizándolo y reduciéndolo a un sistema de ecuaciones lineales. Esta es una alternativa eficiente para resolver los modelos complejos de transferencia de calor y resulta ser una herramienta valiosa en este caso porque permite estimar las propiedades de un material minimizando los procedimientos experimentales, reduciendo costos y tiempos de desarrollo de los experimentos (Hernández-Calderón et al., 2015).

Autores como Bi et al. (2020); Lahoori et al. (2020) y Yan et al. (2019) han propuesto modelos numéricos detallados en dos y tres dimensiones para la determinación de propiedades térmicas de material detrítico.

## 2.4.2 Métodos experimentales

Los métodos experimentales se dividen en métodos de laboratorio, utilizados con muestras de tamaño reducido, y en métodos *in situ*, que se realizan en pozos o zanjas poco profundas mediante sondas (Jorand et al., 2013).

### 2.4.2.1 Métodos de laboratorio

En cuanto a los métodos a escala de laboratorio, en general estos se agrupan en dos categorías: métodos de régimen estacionario, que proporcionan resultados más precisos a pesar de requerir largos períodos de medición; y métodos en régimen transitorio, que destacan por su rapidez, aunque ofrecen una precisión menor.

En la Tabla 5 se muestra una recopilación de los distintos métodos de laboratorio que se han identificado para la determinación de conductividad térmica en material detrítico.

**Tabla 5: Métodos de determinación de conductividad térmica en rocas y material detrítico.**

Régimen estacionario		Régimen transitorio	
Nombre del método	Referencia	Nombre del método	Referencia
Método cilíndrico	(Kersten, 1949)	Sonda aguja	(ASTM D5334-11, 2011)

Placa caliente guardada	(ASTM C177-19, 2019)	Flujo de calor longitudinal comparativo	(ASTM E1225-04, 2004)
Esfera <i>in situ</i>	(Mochlinski, 1964)	Fuente plana transitoria	(S.Gustafsson, 1991)
Fuente de línea transitoria	(Yao & Likos, 2017)	Escaneo óptico	(Popov et al., 2016)
Método de fuente puntual	(Rey-Ronco et al., 2013)		

De entre los métodos para la determinación de propiedades térmicas de material detrítico para régimen estacionario destacan la placa caliente guardada y la esfera *in situ*. Asimismo, entre los métodos transitorios destacan las agujas térmicas (sencillas o dobles) y el método transitorio de fuente plana (Farouki, 1981). Cabe destacar que, sea cual sea la metodología a escala de laboratorio abordada, se debe tener mucho cuidado con la alteración del material y la adaptación de la ecuación de gobierno a las condiciones de contorno del aparato al realizar estas pruebas (Abuel-Naga & Bergado, 2005).

Un ejemplo de aplicación de estos métodos es el trabajo de Nope & de Santiago (2014) quienes midieron la conductividad térmica de suelos mediante el método de la aguja simple y doble, estudiando independientemente los resultados de ambos métodos para luego compararlos. Los valores obtenidos mediante estos dos tipos de sondas resultaron ser similares entre sí, fiables y acordes a valores encontrados en la literatura, para las distintas muestras analizadas.

El estudio de Rey-Ronco et al. (2013) propuso un nuevo procedimiento de laboratorio para calcular la conductividad térmica y la capacidad calorífica volumétrica de detritos de perforación de pozos, utilizando una fuente de calor esférica en el centro de un contenedor con el material de interés y sensores ubicados a distancias conocidas de la fuente para medir las temperaturas a intervalos de tiempo constantes.

Por otro lado, Blázquez et al. (2017) diseñaron un aparato de medición de conductividad térmica tanto para rocas como para suelos, basado en el principio 1S-GHP y utilizando equipamiento habitual de laboratorio.

#### **2.4.2.2 Métodos *in situ***

En proyectos de geotermia a gran escala, el método más utilizado es la prueba de respuesta térmica (TRT), que permite obtener *in situ* la conductividad térmica del terreno. La prueba de

respuesta térmica (TRT), es la metodología tradicional para la determinación *in situ* de la resistencia térmica del pozo y la conductividad térmica de un estrato promedio del suelo en un lugar particular (Gehlin, 2002). La gran ventaja de esta prueba es que permite integrar las propiedades térmicas del suelo a lo largo de toda la profundidad de un sistema de bomba de calor geotérmico, incluidas las aguas subterráneas y el material de relleno, proporcionando una denominada conductividad térmica "efectiva" que incluye los efectos de los distintos materiales.

El método TRT consiste en inyectar calor en el terreno a través de la circulación de un fluido previamente calentado, mientras las temperaturas del fluido tanto de entrada como de salida del terreno son monitoreadas. El comportamiento en el tiempo de dichas temperaturas representa los datos experimentales. Después de un cierto tiempo, se alcanza una diferencia de temperatura constante entre la entrada y la salida, que indica que el sistema está recibiendo una tasa de inyección (o extracción) de calor constante. De las mediciones registradas, se evalúan la resistencia térmica del sondaje y la conductividad térmica del suelo circundante. Este enfoque fue propuesto por primera vez por Morgensen (1983) y se basa en el modelo de fuente de calor lineal (LHS) (Carslaw & Jaeger, 1962).

El primer TRT fue desarrollado paralelamente entre 1995 y 1996 en la Luleå University of Technology en Suecia, y la Oklahoma State University en EE.UU. (A. Gustafsson, 2006). Desde entonces, este método ha sido mejorado y su uso se ha diseminado a otros países como Alemania, Turquía, Japón y China (Gehlin, 2002). Además, recientemente, Nian et al. (2020) presentaron una nueva estimación secuencial para las propiedades térmicas del subsuelo mediante el uso de datos de prueba de respuesta térmica distribuida (DTRT).

A pesar de constituir una solución adecuada para determinar la conductividad térmica del terreno, esta metodología presenta un alto costo relativo, especialmente en pequeñas instalaciones, lo cual significa un aumento importante del presupuesto global (Blázquez et al., 2016).

Por otro lado, la conductividad térmica de material detrítico también se puede establecer a partir de valores bibliográficos (IDAE, 2012), pero deben tomarse con precaución si se pretende realizar el cálculo de una instalación, puesto que este solo se presenta como un valor referencial.

## **2.5 Fundamentos de transferencia de calor**

En este capítulo, se describen los principales parámetros y leyes que rigen los mecanismos de transferencia de calor en medios sólidos y cuya identificación es fundamental para sentar la base teórica de este trabajo, haciendo énfasis en la conducción de calor en sólidos, como mecanismo principal.

### 2.5.1 Propiedades térmicas

El conocimiento de las propiedades termofísicas de los materiales es fundamental si lo que se busca es determinar el potencial geotérmico de una determinada zona o de un material específico, ya sean rocas, suelos, materiales detríticos, materiales industriales u otros. En concreto, las magnitudes de estos parámetros son las que permiten discriminar entre distintos materiales y saber cuál de ellos posee una mejor capacidad para transmitir y almacenar el calor, entre otros aspectos. De esta forma, el presente capítulo detalla las distintas propiedades de interés en el ámbito de la transmisión de calor que son de utilidad para el desarrollo de esta memoria de título.

La conductividad térmica ( $k$ ) es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducir el calor. La conductividad térmica de distintos materiales depende de su estructura atómica interna (Holman, 1998). En este caso, el modelo que describe la transferencia de calor por conducción es la ley de Fourier (Ecuación 1).

Es relevante mencionar que la conductividad térmica en sólidos no metálicos se evalúa experimentalmente y su magnitud es la que define cuán rápido fluye el calor a través de un material y, por ende, si este es un buen conductor de calor. En concreto, cuanto más rápido se mueven los átomos o partículas en sus posiciones de malla, más rápidamente estas propagan energía.

La conducción de calor se rige por la Ley de Fourier (Holman, 1998). Esta ley establece que, si en un cuerpo existe un gradiente de temperatura, el flujo de calor se transmite desde el lugar de mayor temperatura hasta el de menor temperatura (Lienhard IV & Lienhard V, 2017). La cantidad de calor transferida por unidad de tiempo es proporcional al gradiente de temperatura, a la superficie por la cual se transfiere y a la conductividad térmica del cuerpo, considerando el flujo de calor es únicamente en la dirección  $x$ . Esta relación matemática queda expuesta según la siguiente expresión (Ecuación 1):

$$Q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Donde:

$Q$  representa la cantidad de calor transferida por unidad de tiempo o razón de transferencia de calor (W)

$k$  representa el coeficiente de conductividad térmica del material (W/m·K)

$A$  representa el área normal a la dirección del flujo de calor (m<sup>2</sup>)

$\frac{dT}{dx}$  representa el gradiente de temperatura a través del medio conductor (K/m)

En la expresión anterior, se considera un signo negativo con el fin de satisfacer matemáticamente el segundo principio de la termodinámica, es decir, que calor fluye en el sentido donde la temperatura decrece, ya que el flujo de calor se establece desde las regiones de temperatura más alta a las regiones de temperatura más baja (Holman, 1998). Además, los flujos de calor son positivos en el sentido positivo de la coordenada. Para esto, la temperatura debe decrecer en el sentido positivo de la coordenada, es decir,  $\frac{dT}{dx} < 0$ . Por lo tanto, el signo menos sirve para cumplir la convención.

La ley de Fourier también se puede expresar como la razón de transferencia de calor por unidad de área, lo que se llama un flux de calor. Este es proporcional a la conductividad térmica del material y al gradiente de temperatura, considerando que el flux de calor es únicamente en la dirección  $x$ . Según lo anterior se obtiene:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

Donde:

$q$  representa el flux de calor ( $W/m^2$ )

Con lo que se obtiene:



$$q = -k \cdot \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

Las conductividades térmicas de los materiales varían sobre un amplio intervalo. Un valor elevado para la conductividad térmica indica que el material es un buen conductor del calor y un valor bajo indica que es un mal conductor o que es un aislante. En este sentido, las conductividades térmicas de los gases varían en un factor de  $10^4$  con respecto a las de los metales puros como el cobre, ya que los cristales y metales puros tienen las conductividades térmicas más elevadas, y los gases y los materiales aislantes, las más bajas. A continuación, a modo de contextualizar el valor de conductividad térmica en distintos materiales, en la Tabla 6 se muestran los valores de conductividades térmicas de algunos materiales comunes a temperatura ambiente.

**Tabla 6: Valores de conductividad térmica de materiales comunes a temperatura ambiente (Cengel, 2016).**

Material	$k \left( \frac{W}{m \cdot K} \right)$
Cobre	401
Aluminio	237
Vidrio	0.78
Ladrillo	0.72
Agua	0.607
Aire	0.026

La capacidad térmica volumétrica ( $\rho \cdot C_p$ ) de un material se define como la capacidad que tiene un volumen, de una determinada sustancia, para almacenar calor cuando se produce una variación en su temperatura, sin experimentar cambio de fase.

La difusividad térmica ( $\alpha$ ) es el parámetro que representa cuán rápido se difunde el calor por un material, y al igual que la capacidad térmica volumétrica aparecen en el análisis de la conducción de calor para régimen transitorio.

La difusividad térmica es un parámetro que depende tanto de la conductividad térmica del material como de su capacidad térmica volumétrica (Ecuación 4).

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad (4)$$

$\alpha$  representa la difusividad térmica ( $m^2/s$ )

$k$  representa la conductividad térmica del material ( $W/m \cdot K$ )

$\rho$  representa la densidad del material ( $kg/m^3$ )

$C_p$  representa el calor específico del material ( $J/kg \cdot K$ )

### 2.5.2 Modelos de fuentes de calor

Cuando se tratan fuentes de calor, es necesario conocer la intensidad volumétrica de liberación de calor, que se expresa generalmente en  $W/m^3$  (Ingersoll et al., 1948). En función de las características geométricas de las fuentes de calor, estas se pueden clasificar en cuatro tipos: puntuales, lineales, superficiales y volumétricas.

1. Se considera una fuente de calor puntual cuando sus dimensiones en todas las direcciones son infinitamente pequeñas, es decir, la fuente resulta pequeña en comparación con el cuerpo al cual calienta.
2. Una fuente lineal de calor puede considerarse como una serie continua de fuentes puntuales de calor a lo largo de una línea recta en un medio infinito en el cual se transfiere el calor.
3. Se hablará de fuentes de calor superficiales cuando dos de las tres dimensiones espaciales que definen la fuente de calor son mucho mayores que la tercera.
4. Las fuentes volumétricas de calor se consideran cuando sus tres dimensiones son lo suficientemente grandes respecto al medio considerado al producir calor. Como simplificación común, cuando se tiene una fuente volumétrica esférica de dimensiones muy reducidas puede aproximarse a una fuente puntual.

### 2.5.3 Mecanismos de transferencia de calor

La transferencia de calor es un proceso termofísico que describe el tránsito de energía de un cuerpo a otro o entre dos partes de un mismo cuerpo. De manera espontánea, el calor fluye desde una zona de mayor temperatura a una de menor temperatura, y nunca al contrario si es que no se realiza trabajo. De esta forma, el cuerpo que entrega calor se denomina fuente o foco caliente y aquel que la recibe se denomina receptor o foco frío (Kern, 1999).

Los mecanismos de transferencia de calor pueden ser clasificados en conducción, convección y radiación.

#### 2.5.3.1 Transferencia de calor por convección

Este mecanismo de transferencia de calor se puede dar entre una superficie sólida y un fluido adyacente que esté en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos (Cengel, 2016). Se está en presencia de convección cuando el transporte de calor se debe a que volúmenes de líquido o de gas se mueven, de regiones que están a una temperatura determinada a otras regiones que poseen una temperatura diferente. Generalmente, entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección.

La transferencia de calor por convección se describe mediante la ley de enfriamiento de Newton (Ecuación 5).

$$Q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (5)$$

Donde:

$Q$  representa la razón de transferencia de calor (W)

$h$  representa el coeficiente de transferencia de calor por convección ( $W/m^2 \cdot K$ )

$A$  representa el área normal a la dirección del flujo de calor ( $m^2$ )

$T_s$  representa la temperatura de la superficie del sólido (K)

$T_\infty$  representa la temperatura del seno del fluido en movimiento (K)

La convección recibe el nombre de convección forzada si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba, o el viento. Como contraste, se dice que es convección natural si el movimiento es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura del fluido.

Este mecanismo de transferencia de calor puede ser relevante en algunos aspectos experimentales de este trabajo, sin embargo, no se aborda en más detalle puesto que excede el alcance y los objetivos planteados.

### **2.5.3.2 Transferencia de calor por radiación**

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas o fotones, como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de los mecanismos de conducción y convección, la transferencia de calor radiante no requiere la intervención de un medio, y el calor puede ser transmitido por radiación a través del vacío absoluto (Kern, 1999).

### **2.5.3.3 Transferencia de calor por conducción**

El mecanismo de interés en este trabajo es el de transferencia de calor por conducción. Esta transferencia de calor se da cuando hay contacto directo entre las partículas de los cuerpos involucrados que están a distintas temperaturas. Este proceso ocurre a escala atómica y se da por el choque entre las moléculas. De esta forma, las partículas más energéticas le entregan energía a las menos energéticas.

La conducción de calor va generalmente acompañada de variaciones de temperatura en el tiempo y en el espacio. Si se unen todos los puntos de un cuerpo tridimensional que estén a la misma temperatura se obtiene una superficie de igual temperatura denominada isoterma. La isoterma de un cuerpo es el lugar geométrico conformado por los puntos que tienen igual temperatura.

### **2.5.4 Ecuación fundamental de la conducción de calor**

La ecuación fundamental de la transferencia de calor por conducción describe la distribución espacial y temporal de temperaturas en un medio continuo, mediante la ley de Fourier (Ecuación 1).

Así, la resolución de la ecuación permite determinar la temperatura de cualquier punto del medio para cualquier instante de tiempo (Cengel, 2016).

Se asume que el cuerpo en donde fluye el calor está compuesto por un material homogéneo. El resultado de esta ecuación diferencial, para condiciones de contorno determinadas, proporciona la distribución de temperaturas en el medio en función del tiempo.

Se considera un elemento rectangular de dimensiones  $dx, dy, dz$ . El balance de energía sobre este elemento, durante un intervalo de tiempo  $dt$  se puede expresar como:

$$Q_{entra} - Q_{sale} + Q_{gen} = Q_{alm} \quad (6)$$

Donde:

$Q_{entra}$  representa la razón de conducción del calor en  $x, y, z$  (W)

$Q_{sale}$  representa la razón de conducción del calor en  $dx + x, dy + y, dz + z$  (W)

$Q_{gen}$  representa la velocidad de generación de calor en el interior del elemento (W)

$Q_{alm}$  representa la razón de cambio del contenido de energía del elemento (W)

Estas cantidades vienen dadas por:

$$Q_{entra} = Q_x + Q_y + Q_z \quad (7)$$

$$Q_{sale} = Q_{x+dx} + Q_{y+dy} + Q_{z+dz} \quad (8)$$

$$Q_{gen} = \dot{q} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (9)$$

$$Q_{alm} = \rho \cdot C_p \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (10)$$

Donde:

$Q_{x,y,z}$  representan la razón de calor que entra al elemento, en los distintos ejes cartesianos (W)

$Q_{x+dx,y+dy,z+dz}$  representa la razón de calor que sale del elemento, en los distintos ejes cartesianos (W)

$\dot{q}$  representa la energía generada por unidad de volumen y por unidad de tiempo ( $W/m^3$ )

$\rho$  representa la densidad del material ( $kg/m^3$ )

$C_p$  representa el calor específico del material ( $J/kg \cdot K$ )

$T$  representa la temperatura (K)

$t$  representa el tiempo (s)

Reemplazando los términos del (7) al (10) en (6) se obtiene:

$$Q_x + Q_y + Q_z - Q_{x+dx} - Q_{y+dy} - Q_{z+dz} + \hat{q} \cdot dx \cdot dy \cdot dz = \rho \cdot C_p \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (11)$$

A su vez, la razón de conducción de calor en  $x$ ,  $y$  y  $z$  se puede definir como:

$$Q_x = -k \cdot dy \cdot dz \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (12)$$

$$Q_y = -k \cdot dx \cdot dz \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \quad (13)$$

$$Q_z = -k \cdot dy \cdot dx \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \quad (14)$$

Donde:

$k$  representa la conductividad térmica del material (W/m·K)

De la misma manera, la razón de conducción de calor en  $x + dx$ ,  $y + dy$ ,  $z + dz$  se puede definir como:

$$Q_{x+dx} = - \left[ k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) \cdot dx \right] \cdot dy \cdot dz \quad (15)$$

$$Q_{y+dy} = - \left[ k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) \cdot dy \right] \cdot dx \cdot dz \quad (16)$$

$$Q_{z+dz} = - \left[ k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \cdot dz \right] \cdot dx \cdot dy \quad (17)$$

Reemplazando los términos del (12) al (17) en (11) finalmente se obtiene la ecuación general de la conducción de calor tridimensional en coordenadas cartesianas (Ecuación 18).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \hat{q} = \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (18)$$

Se puede hacer una simplificación de esta ecuación considerando que la conductividad térmica es constante en todas las direcciones del sólido tridimensional, por tanto, si se tiene en cuenta esto, la ecuación resultante es la siguiente:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (19)$$

Donde:

$a$  representa el coeficiente de difusividad térmica ( $m^2/s$ )

Si además se asume que no hay generación o disipación de energía en el medio analizado, la expresión quedaría finalmente expresada de la siguiente manera:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (20)$$

Para la resolución de esta ecuación es necesario aplicar una serie de condiciones para la temperatura: una condición inicial relativa a la distribución temporal inicial de las temperaturas y dos condiciones de contorno relativas a su distribución espacial por cada dirección.

En lo que se refiere a las condiciones de contorno, son tres los tipos más habituales: de primera, de segunda y de tercera especie.

La condición de primera especie o condición de Dirichlet se corresponde con el caso en que la temperatura de la superficie ( $T_s$ ) es igual a la temperatura del medio que la rodea ( $T_m$ ).

$$T_s(x, y, z, t) = T_m \quad (21)$$

La condición de segunda especie o condición de Von Neumann, se corresponde con el caso en el que se establece un flujo de calor fijo hacia o desde la superficie normal al flujo de calor, según sea el caso.

$$Q(x, y, z, t) = -k \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \quad (22)$$

La condición de tercera especie se corresponde con el caso en que existe cierto intercambio de calor por convección entre la superficie del cuerpo y sus alrededores, siendo este intercambio proporcional a la diferencia de temperaturas entre la superficie ( $T_s$ ) y el medio que la rodea ( $T_m$ ).

$$Q(x, y, z, t) = h \cdot A \cdot [T_m - T(x, y, z, t)] \quad (23)$$

En la cual,  $h$  es el coeficiente de convección, expuesto en la ecuación de enfriamiento de Newton.

### 2.5.5 Ley de Fourier para flujos de calor a través de paredes esféricas

Para la transmisión de calor por conducción en el caso de una pared esférica de material de conductividad térmica,  $k$ , la ley de Fourier se puede expresar en coordenadas esféricas. Para esto, se transforma la ecuación en coordenadas cartesianas (Ecuación 18), mediante técnicas normales de cálculo, con lo que se obtiene:

$$q_R = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial R} \quad (24)$$

$$q_\theta = -\frac{k}{R} \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta} \quad (25)$$

$$q_\phi = -\frac{k}{R \cdot \sin\theta} \cdot \frac{\partial T}{\partial \phi} \quad (26)$$

$$\frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial R^2} (RT) + \frac{1}{R^2 \cdot \sin^2\theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin\theta \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{R^2 \cdot \sin^2\theta} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\hat{q}}{k} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (27)$$

Donde:

$T$  representa la temperatura (K)

$\hat{q}$  representa la energía generada por unidad de volumen y por unidad de tiempo ( $\text{W}/\text{m}^3$ )

$k$  representa la conductividad térmica del material ( $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ )

$a$  representa la difusividad térmica del material ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$t$  representa el tiempo (s)

Dada la simetría del problema, en estas condiciones el flujo térmico del sistema debe ser radial y las superficies isotermas esferas concéntricas entre sí y con la pared esférica, de forma que la temperatura depende únicamente de la distancia al centro de las esferas.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, y considerando la ley de Fourier para un flux de calor unidimensional (en el que solo se transfiere calor radialmente), se tiene la siguiente ecuación:

$$q = -k \cdot \frac{\Delta T}{R} \quad (28)$$

Donde:

$q$  representa el flux de calor ( $W/m^2$ )

$k$  representa la conductividad térmica de la muestra del material detrítico ( $W/m \cdot K$ )

$\frac{\Delta T}{R}$  representa el gradiente de temperatura en el radio  $R$  respecto de la bombilla ( $K/m$ )

Por otro lado, se tiene que un flujo se puede expresar como potencia por unidad de área y, considerando el área de la bombilla como una esfera en la que toda la potencia eléctrica se transforma en calor, el que se distribuye uniformemente en todas las direcciones, el flux de calor que sale de la bombilla se puede expresar como (Rey-Ronco et al., 2013):

$$q = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad (29)$$

Donde:

$P$  representa la potencia de la bombilla ( $W$ )

$R$  representa el radio de la bombilla ( $m$ )

Igualando las ecuaciones (28) y (29), se obtiene:

$$\Delta T = -\frac{P}{4 \cdot \pi \cdot k} \cdot \frac{1}{R} \quad (30)$$

Si ahora se considera  $R$  como la distancia entre del sensor de referencia (más cercano a la fuente de calor) y otros sensores, se obtiene:

$$R = R_i - R_{ref} \quad (31)$$

Donde:

$R_i$  representa la distancia entre el sensor  $i$  y el sensor de referencia ( $m$ )

$R_{Ref}$  representa la distancia del sensor de referencia a la fuente de calor ( $m$ )

Por lo que la expresión se transforma a:

$$\Delta T = -\frac{P}{4 \cdot \pi \cdot k} \cdot \frac{1}{R_i} + \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot k} \cdot \frac{1}{R_{Ref}} \quad (32)$$

La ecuación (32), propuesta por Rey-Ronco et al. (2013) para la determinación de la conductividad térmica de materiales, considerando la bombilla como una fuente de calor puntual, es la que se utiliza para determinar la conductividad térmica de la muestra de material detrítico del experimento.

Teniendo en cuenta que (32) es una ecuación de primer grado, donde la incógnita es la variable  $x$ , la ecuación se puede graficar en el sistema cartesiano como una línea recta, y se puede escribir como:

$$y = u \cdot x + v \quad (33)$$

Donde:

$y$  representa la variable dependiente

$u$  representa la pendiente de la línea recta, es un valor constante

$x$  representa la variable independiente

$v$  representa el punto donde la recta corta al eje  $y$ , es un valor constante

De este modo, la ecuación (32) no es más que una ecuación de primer grado, en donde  $\Delta T_i$  representa la variable dependiente, y  $\frac{1}{R_i}$  representa la variable independiente. Por lo tanto:

$$y = \Delta T_i \quad (34)$$

$$x = \frac{1}{R_i} \quad (35)$$

$$u = -\frac{P}{4 \cdot \pi \cdot k} \quad (36)$$

$$v = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot k} \cdot \frac{1}{R_{Ref}} \quad (37)$$

Teniendo todo esto en cuenta, según el método propuesto por Rey-Ronco et al. (2013), para cada valor de  $\Delta T_i$  existe un valor de  $\frac{1}{R_i}$  (según la ecuación 32). Al graficar estos puntos en el plano

cartesiano se ve que estos siguen una tendencia lineal, por tanto, se realiza un ajuste lineal a los datos, obteniendo una línea recta.

De este modo, la conductividad térmica del material puede ser determinada a partir de la pendiente de la línea [ $u = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot k_u}$ ] o la intersección de la línea con el eje- $y$  [ $v = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot k_v \cdot R_{Ref}}$ ]. Mediante

este método se obtienen dos valores de  $k$ .

### 3 Desarrollo experimental

El experimento que se realiza en la presente investigación corresponde a la determinación de la conductividad térmica para materiales detríticos. A continuación, se describe paso a paso el desarrollo de este experimento, desde su fase de planificación, en la que se define la metodología a llevar a cabo y los materiales considerados esenciales para lograr obtener valores confiables de conductividad para las muestras de estudio, hasta la fase final de adquisición de datos.

#### 3.1 Introducción

En geología, el material detrítico o detritos son el llamado material suelto o sedimentos. Son los productos de la erosión, el transporte, la meteorización química y física; y procesos diagenéticos (Navarrete, 2010). Un material detrítico típico y muy conocido son las arcillas. Otro material detrítico común es el cuarzo, aunque también se pueden encontrar minerales como feldespatos y micas (Pettijohn, 1975).

En Chile, las rocas graníticas meteorizadas originan materiales detríticos de textura arenosa, comúnmente llamados “maicillo”. Este material es uno de los suelos residuales más comunes y abundantes en Chile (Rodríguez, 2015), pero corresponde en rigor a un Arenosols (Toro, 2007). Según la clasificación de la FAO (2006), Arenosols comprende a los suelos arenosos, incluyendo también los suelos desarrollados en arenas residuales después de la meteorización *in situ* de sedimentos ricos en cuarzo o roca, y suelos desarrollados en depósitos de arenas desarrolladas recientemente como las dunas y playas.

El término suelo, empleado en ingeniería, se refiere a un material complejo constituido por partículas sólidas de varias composiciones (minerales y / u orgánicas) y diversas formas y tamaños que se disponen aleatoriamente con espacios de poros entre ellos. Estos poros, en general, contienen aire o agua en cualquier fase (gaseosa, líquida o sólida).

En suelos, debido a su naturaleza heterogénea y polifásica, la transferencia de calor involucra múltiples procesos, entre los que destacan los mecanismos de conducción, convección y radiación. La preponderancia de cada uno de estos procesos por sobre el otro depende directamente de las fracciones de sólidos, agua o aire del suelo, así como del tamaño de partículas (Alrtimi et al., 2016).

Si bien el flujo de calor por conducción es el mecanismo predominante, la convección y la radiación generalmente tienen efectos relativamente pequeños o insignificantes. En concreto, en suelos saturados, el mecanismo de transferencia dominante es la conducción. La convección solo reviste importancia en suelos altamente permeables con presencia de velocidades de flujo de agua

mayores o iguales a  $1 \cdot 10^{-3}$  cm/s (Low et al., 2015). La radiación suele despreciarse, ya que representa menos del 1% del calor total transferido (Jumikis, 1978).

La conductividad térmica de suelos no está determinada solo por las propiedades físicas intrínsecas de cada componente del suelo, sino que también se ve afectado por la fracción de volumen del mismo (Dong et al., 2015). Específicamente, los principales factores de influencia de la conductividad térmica del suelo incluyen el grado de saturación, la densidad seca, la mineralogía del suelo, el tamaño de partícula, la gradación, la geometría del empaque, etc. (Farouki, 1981; Johansen, 1975).

Teniendo en cuenta la mineralogía del suelo y la conductividad térmica de los distintos componentes de este, la conductividad térmica del cuarzo es la más alta entre todos los minerales del suelo (6.15 W/m·K a 11.3 W/m·K). Por otro lado, teniendo en cuenta la porosidad de la muestra, la conductividad térmica del agua (0.607 W/m·K) es mucho mayor a la del aire seco (0.026 W/m·K), de este modo, se puede esperar una conductividad térmica más alta para rocas saturadas de agua y una conductividad más baja para rocas con gas o porosas secas. Por lo tanto, los efectos del contenido de agua y cuarzo en la conductividad térmica del suelo son más importantes que otros factores (Zhang & Wang, 2017).

### **3.2 Diseño y planificación del experimento**

Haciendo uso de la información recopilada y planteada en el estado del arte del presente informe acerca de las técnicas existentes para la determinación de las propiedades térmicas en suelos y materiales detríticos, se plantea una metodología similar a la propuesta por Rey-Ronco et al. (2013), debido a que este se lleva a cabo a escala de laboratorio con ripios de perforación (materia granular de características parecidas al maicillo) y emplea tecnología de bajo costo.

La metodología propuesta utiliza una fuente de calor esférica (lámpera incandescente) inserta al centro de un recipiente cilíndrico lleno de material detrítico sedimentario. Distribuidos en el interior de la muestra a distancias determinadas de la fuente de calor, se instalan una serie de sensores de temperatura. El experimento comienza cuando se conecta la lámpara a la corriente eléctrica y comienza el calentamiento paulatino de la muestra a su alrededor. Al cabo de un periodo de tiempo, la temperatura del contenedor tiende a estabilizarse en un máximo determinado por la potencia de la lámpara, las propiedades térmicas del material detrítico y las condiciones térmicas ambientales. Una vez alcanzado el régimen estacionario de temperaturas, se desconecta la lámpara y comienza el enfriamiento del material hasta volver a la temperatura fijada por el ambiente.

Mediante el uso de los sensores de temperatura, se miden, almacenan y analizan posteriormente la evolución y distribución de temperaturas del material durante todo el experimento, lo que permite determinar la conductividad térmica del material ensayado, como se describe en el apartado 2.5.5.

El diseño del experimento se realiza utilizando materiales que se encuentran a disposición en las instalaciones de la universidad o que se encuentren a la venta en el mercado a bajo costo. Siguiendo esta premisa, se emplea como contenedor para emplazar el material dérmico un barril de polietileno. En este recipiente se vierte el material y se dispone en la posición central la fuente de calor. A continuación, en una disposición radial sobre un mismo plano (para evitar que se produzcan interferencias en el flujo de calor que influyen las mediciones) se disponen los sensores. Este diseño se muestra de forma esquemática en las Figuras 2 y 3.

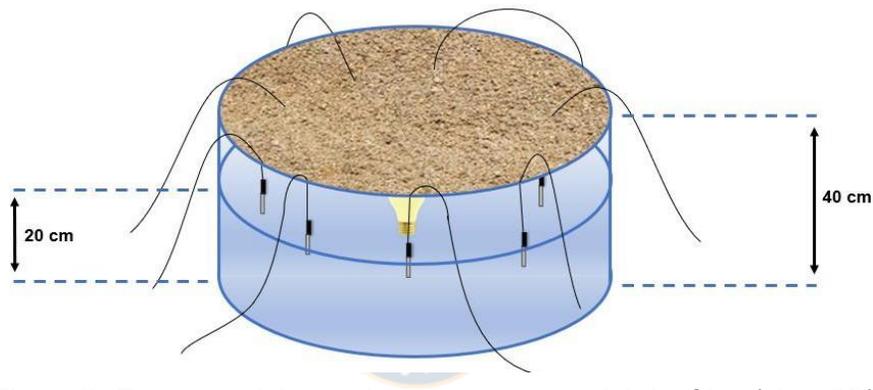


Figura 2: Esquema del experimento para material dérmico (vista 3D).

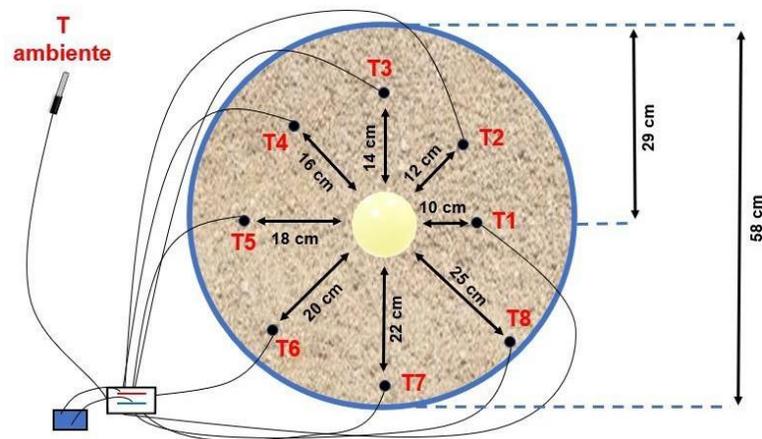


Figura 3: Esquema del experimento para material dérmico (vista en planta).

Para monitorizar el comportamiento del flujo de calor tanto en las zonas más cercanas a la fuente de calor como en las zonas más distantes, se opta por posicionar los sensores de temperatura cada 45 grados sexagesimales, a 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22 y 25 cm del centro de la bombilla.

### 3.3 Materiales utilizados

En el presente apartado se describen los materiales utilizados para el montaje del experimento, destacando sus características y especificaciones técnicas.

#### Muestra de estudio

Se utilizan 180 kg de muestra de material detrítico seco, comúnmente llamado maicillo.

#### Barril de polietileno

Como contenedor para el material de estudio, se emplea un barril de polietileno de 200 litros de capacidad cortado a la mitad, resultando en un recipiente cilíndrico de 29 centímetros de radio y 40 centímetros de altura (Figura 4), graduado en su borde interno con una cinta métrica para medir y controlar el proceso de llenado con la muestra.



*Figura 4: Barril de polietileno de 200 litros cortado a la mitad y graduado en su borde con una cinta métrica.*

#### Lámpara de incandescencia y portalámparas

La fuente de calor utilizada es una bombilla de 42 W (Figura 5). Para la conexión eléctrica se utiliza un portalámparas de loza, resistente a altas temperaturas.



*Figura 5: Lámpara de 42 W de potencia con portalámparas de loza.*

### Sensores de temperatura ds18b20

Se utilizan nueve sensores digitales de temperatura ds18b20, como el que se muestra en la Figura 6. Estos sensores pueden medir en un intervalo de temperatura de  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con una precisión de  $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (las especificaciones técnicas de este material se encuentran en Anexo 1).



Figura 6: Sensor de temperatura ds18b20.

### Placa programable Arduino

Se utiliza una placa programable Arduino UNO (véanse las especificaciones técnicas en Anexo 1) para gestionar la toma de datos con los sensores de temperatura dispuestos en el experimento (Figura 7).



Figura 7: Placa programable Arduino UNO.

### Unidad de almacenamiento y procesamiento de datos

Se utiliza un ordenador portátil para almacenar los datos y programar el Arduino (Figura 8). El programa Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo (software), diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios (<https://www.arduino.cc/>). Para la realización de este experimento,

es requerido el programa Arduino para la programación de la placa. Además, es utilizada la aplicación Matlab para la representación de datos y control visual de la evolución del experimento en tiempo real.



*Figura 8: Unidad de almacenamiento de datos (ordenador portable).*

### **3.4 Desarrollo del experimento**

El desarrollo de la actividad experimental comienza con la toma de muestras en terreno, después se prepara la muestra, se realiza la calibración de sensores, el montaje del experimento y, una vez conseguida la confiabilidad técnica del dispositivo, se realiza la experimentación y toma de datos. Finalmente, se realiza el análisis de datos y se presentan los resultados.

#### **3.4.1 Toma de la muestra**

La muestra de material detrítico se obtiene de un talud expuesto ubicado a los pies del Cerro Caracol (Figura 9), dentro de las dependencias de la Universidad de Concepción, en la Región del Bío-Bío, Chile (Figura 10).



*Figura 9: Zona de obtención de la muestra de material detrítico.*

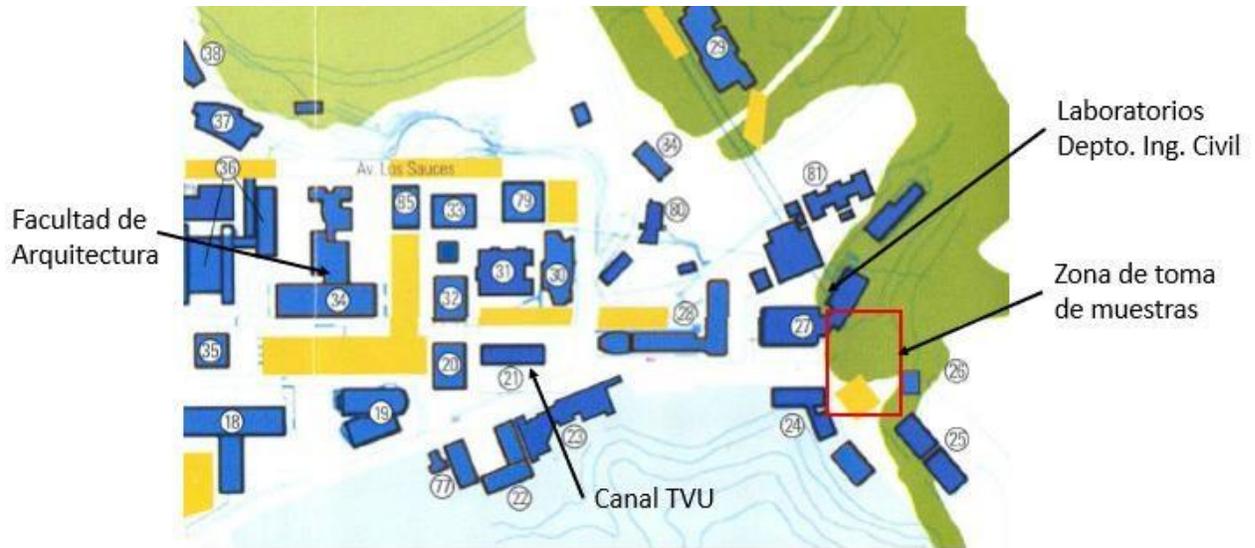


Figura 10: Mapa de la Universidad de Concepción con la ubicación de la zona de muestreo (Cedeus, 2014).

La remoción de la muestra se realiza manualmente y utilizando sacos como medio de almacenamiento, los que fueron sellados y transportados a las dependencias del DIMET.

### 3.4.2 Preparación de la muestra

El material detrítico es trasladado al Laboratorio de Mecánica de Rocas del Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Concepción, se separa en bandejas y se seca durante aproximadamente 24 horas a una temperatura de 50 °C, en un horno de secado del Laboratorio de Flotación, también en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Concepción (Figura 11).



Figura 11: Procedimiento de secado de la muestra.

Después, la muestra se homogeneiza según las técnicas estandarizadas (American Society for Testing and Materials, 2018), y se almacena en el Laboratorio de Mecánica de Roca (Figura 12).

se procede a separar la muestra en dos, para luego verterla en el barril de polietileno previamente graduado.



*Figura 12: Procedimiento de homogeneización de la muestra.*

A continuación, se procede a separar una submuestra para realizar su caracterización granulométrica y una submuestra para su caracterización mineralógica.

### **3.4.3 Disposición de la fuente de calor y los sensores de temperatura**

Con la muestra seca homogeneizada, se llena el barril hasta la mitad de su altura (20 cm). La muestra se distribuye definiendo un plano horizontal en todo el barril y se procede a colocar en el centro, sobre la muestra, la fuente de calor (bombilla). Por último, se colocan los sensores hincados verticalmente, en las posiciones definidas previamente (Figura 4) de forma radial y a distancias crecientes de la fuente de calor (Figura 13).



*Figura 13: Disposición de los sensores y la fuente de calor según el modelo planteado.*

Una vez que todo está dispuesto correctamente, se procede a llenar el barril con la mitad restante de material, hasta llenarlo a su capacidad máxima.

### 3.4.4 Conexión y programación del sistema de monitoreo

Antes de realizar las conexiones en el sistema de monitoreo de debe descargar la aplicación Arduino y se debe corroborar el correcto funcionamiento de los sensores de temperatura ds18b20. Los sensores no deben calibrarse, dado que son del tipo termistor.

Para programar la placa, se descarga del sitio web oficial de Arduino (<https://www.arduino.cc/>) la aplicación Arduino, que es libre y gratuita. Una vez instalada la aplicación, se compila un código para gestionar la medición de temperatura con los 9 sensores digitales ds18b20 (el código se adjunta en el Anexo 2).

La corroboración se hace para mediciones con dos puntos a 20 °C y a 80 °C en un baño con agua destilada, utilizando un termómetro de bulbo de mercurio. Es importante además realizar una revisión o inspección visual para comprobar que el sensor y los cables están bien y asegurar que el sensor no esté torcido o dañado.

Una vez que los sensores ya fueron dispuestos en el contenedor, se procede a realizar las conexiones. Los ocho sensores enterrados en el interior de la muestra y uno emplazado en el exterior del barril para monitorizar la temperatura ambiente en el laboratorio se conectan al Arduino mediante una placa de conexiones (Figura 14). Además, se requiere de una resistencia “pull-up” en el pin DQ de la placa Arduino, para este caso, una resistencia de 4.7 kΩ. Esto se debe realizar para que la comunicación entre los sensores y la placa Arduino funcione. Se requieren dos librerías para poder establecer la comunicación con un sensor ds18b20 y la placa Arduino. La primera es la librería OneWire y la segunda es la librería DallasTemperature.

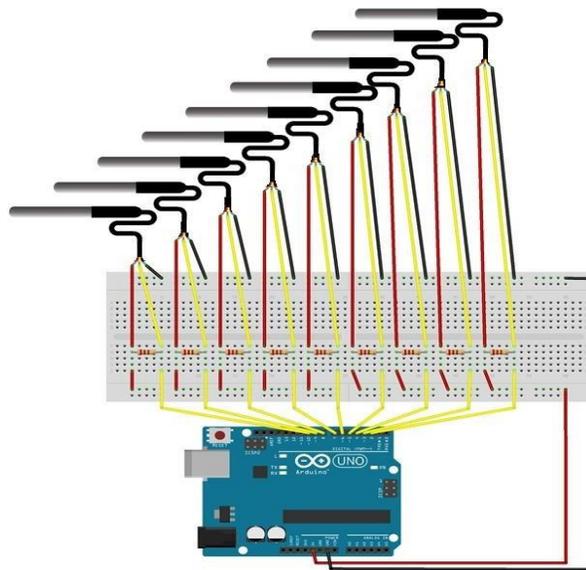


Figura 14: Esquema de conexión de los sensores a la placa Arduino.

El Arduino a su vez es conectado al ordenador portátil. Una vez ya teniendo el ordenador con el programa Arduino instalado, se debe configurar el IDE de Arduino, seleccionando la placa que se usará, para este caso una placa Arduino UNO. Una vez que se tiene la placa seleccionada, se busca y selecciona el puerto COM que está conectado al Arduino. Finalmente se debe configurar el IDE, es decir, seleccionar el tipo de programador que utiliza Arduino.

Los valores de temperatura medidos en tiempo real por los sensores gestionados con el Arduino se almacenan en intervalos de 15 segundos en el ordenador mediante el uso del software Matlab (el código se adjunta en el Anexo 3). Se programa una interfaz gráfica que permite visualizar en tiempo real las mediciones de temperatura en cada sensor a lo largo del tiempo que dura el experimento, obteniéndose finalmente un gráfico de evolución de temperatura en función del tiempo de todos los sensores.

### 3.4.5 Toma de datos

Para este experimento se realizaron dos pruebas, llamadas experiencia 1 y experiencia 2. El resultado final de la toma de datos en cada una de las dos experiencias realizadas con el material detrítico, son ocho series temporales de mediciones de temperatura, es decir, una por cada sensor.

Los gráficos de temperatura v/s tiempo por cada sensor presente en el sistema permiten identificar tres fases o procesos térmicos:

1. La fase de calentamiento inicia en el segundo 0, es decir, en el momento en que comienza el paso de corriente a la lámpara incandescente y, por ende, esta comienza a generar un flujo de calor esférico dentro del sistema. A su vez, esta etapa finaliza cuando la variación de la temperatura en el tiempo decrece a un punto tal que la curva presenta una pendiente prácticamente igual a 0. En este momento, se da comienzo a la fase estable.
2. La fase estable comienza al terminar la fase de calentamiento, cuando las temperaturas de los ocho sensores se estabilizan. Esta fase se prolonga hasta que se desconecta la lámpara incandescente.
3. La fase de enfriamiento inicia cuando la lámpara se desconecta. El experimento termina cuando la temperatura del sensor más cercano a la fuente de calor se iguala a la de la temperatura ambiente.

Como se aprecia en la Figura 15, la experiencia 1 tiene una duración total de 341 horas. Como se observa, la etapa de calentamiento de la experiencia 1 termina al cabo de 60 horas de comenzado el flujo de calor a través del sistema, aproximadamente. A partir de este momento, la misma cantidad de calor que entra al sistema a través de la bombilla sale por la parte superior del

mismo (régimen estacionario), entrando a la denominada fase estable, que se extiende desde la hora 60 hasta la hora 312, momento en el que se corta el suministro de corriente de la fuente de calor, contemplando un total de 252 horas. Finalmente, la fase de enfriamiento tiene una duración cercana a las 40 horas.

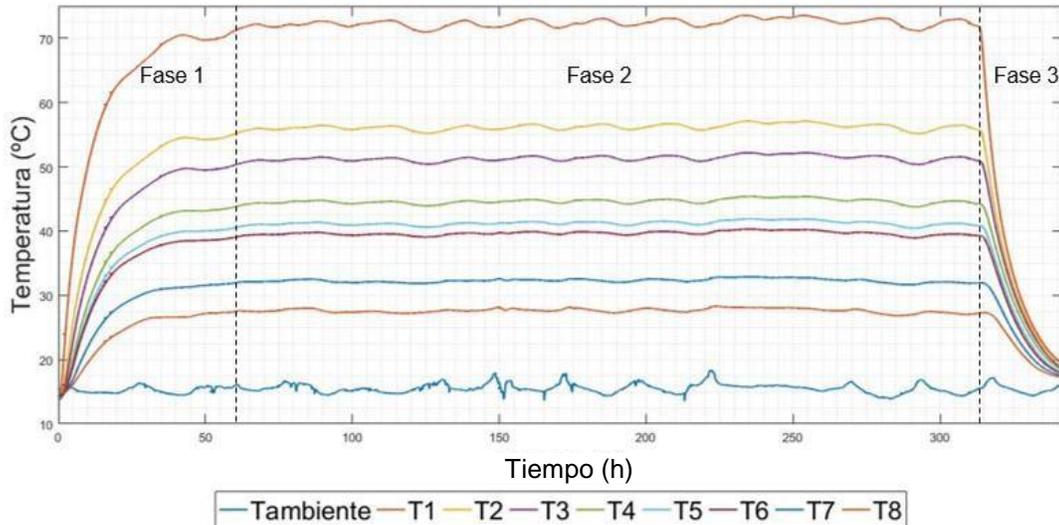


Figura 15: Gráfico obtenido de la experiencia 1 ( $^{\circ}\text{C}$  v/s horas).

La experiencia 2 (Figura 16) tiene una duración de 216 horas. De igual forma, la etapa de calentamiento de esta experiencia termina al cabo de 60 horas, entrando a una fase estable de 68 horas y, finalmente, a una fase de enfriamiento de 40 horas.

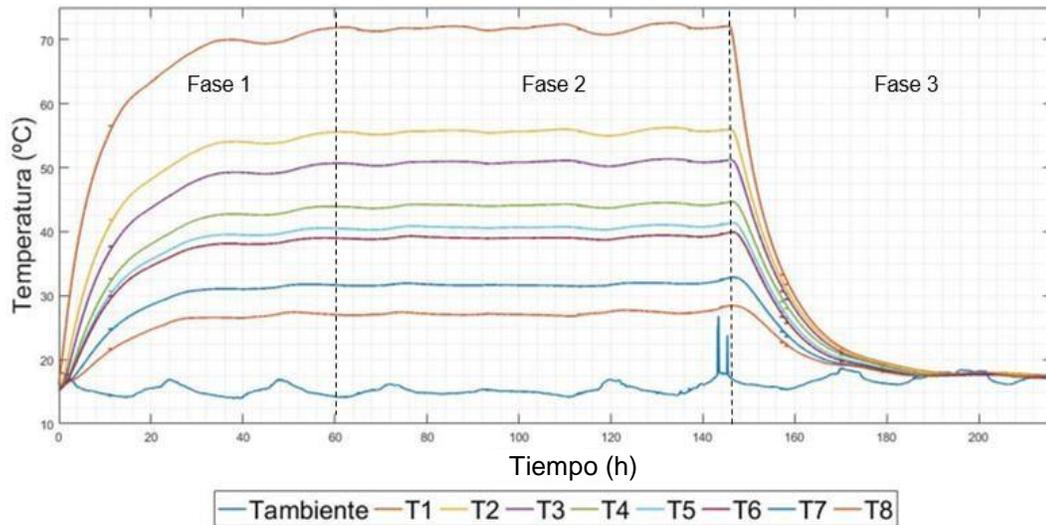


Figura 16: Gráfico obtenido de la experiencia 2 ( $^{\circ}\text{C}$  v/s horas)

## 4 Resultados y discusiones

En el siguiente apartado se exponen los resultados obtenidos de forma experimental, para las dos pruebas realizadas, como también las simulaciones realizadas mediante el software COMSOL Multiphysics®.

### 4.1 Análisis granulométrico

Con el fin de conocer la distribución de tamaño de partículas de la muestra de material detrítico, se realiza un análisis granulométrico cuadruplicado mediante tamizado en seco. Los datos reportados en la Tabla 7, se reportan los valores promedio de los cuatro análisis. En la muestra analizada se obtiene un d50 de 525.50 micrones, y un d80 de 1949.82 micrones.

**Tabla 7: Distribución granulométrica de la muestra utilizada.**

	Intervalo en micrones		Tamaño en micrones	Tamaño en milímetros	Masa retenida(g)	Frecuencia	Frecuencia acumulada
Malla	xi	xi+1	Promedio $(xi*xi+1)^{0.5}$		N	fi %	Ri %
4	4750	4750	4750.00	4.75	6.46	3.23	3.23
6	4750	3350	3989.05	3.99	8.7	4.35	7.58
8	3350	2360	2811.76	2.81	9	4.5	12.08
10	2360	2000	2172.56	2.17	11.2	5.6	17.68
14	2000	1400	1673.32	1.67	10.4	5.2	22.88
20	1400	850	1090.87	1.09	9.4	4.7	27.58
28	850	600	714.14	0.71	28.6	14.3	41.88
35	600	500	547.72	0.55	12.6	6.3	48.18
60	500	250	353.55	0.35	31.8	15.9	64.08
100	250	150	193.65	0.19	20	10	74.08
140	150	106	126.10	0.13	11.8	5.9	79.98
200	106	75	89.16	0.09	9.4	4.7	84.68
250	75	63	68.74	0.07	4.2	2.1	86.78
270	63	53	57.78	0.06	2.2	1.1	87.88
bandeja	53	0	< 57.78	< 0.06	24.2	12.1	99.98
	total				200	99.98	

Según los tamaños de partícula obtenidos en la muestra de material detrítico, considerando el análisis granulométrico realizado (Tabla 7) y la clasificación de los suelos para usos de ingeniería dado por la norma (ASTM D2487-17, 2017), se tiene que la muestra puede catalogarse como un suelo de grano grueso, debido a que más del 50% de las partículas que lo componen quedaron retenidas en el tamiz N° 200 (para este caso cerca del 80% de las partículas). En la clasificación de suelo grueso se puede considerar según el tamaño de partículas de la muestra un suelo arenoso fino, en donde más del 50% de las partículas se encuentran en el intervalo de tamaños de 0.05 mm a 0.35 mm.

## 4.2 Análisis mineralógico

Con el fin de caracterizar la muestra de estudio, para saber con qué tipo de material se está trabajando, se realiza un análisis mineralógico mediante la técnica de difracción de rayos X con un equipo Bruker D4 Endeavor, operado con radiación de Cu y filtro de radiación  $K\beta$  de Ni, un análisis mineralógico semicuantitativo.

A continuación, se disponen tabulados los contenidos porcentuales y densidad promedio de cada mineral presente en la muestra de material detrítico utilizada en el experimento, comúnmente llamado maicillo (Tabla 8).

**Tabla 8: Porcentaje mineral y densidad de cada componente presente en la muestra de material detrítico.**

Mineral	Contenido porcentual (%)	Densidad promedio (kg/m <sup>3</sup> )
Moscovita	32.7	2830
Cuarzo	26.6	2650
Albita	24.8	2610
Caolinita	15.9	2600

Considerando lo anterior, se tiene una densidad promedio estimada del material detrítico de estudio de 2690 kg/m<sup>3</sup>, sin considerar la porosidad del material.

## 4.3 Conductividad térmica experimental

El valor de conductividad térmica  $k$  para la muestra de material se calcula realizando un promedio simple entre  $k_u$  y  $k_v$ , según la metodología propuesta por Rey-Ronco et al. (2013), expuesta en el apartado 2.5.5.

El término  $k_u$  representa la conductividad térmica del material, considerando la pendiente de la línea obtenida al realizar el ajuste lineal con los datos de las temperaturas de la fase estable (Figura 17). Por otro lado, el término  $k_v$  representa la conductividad térmica del material, considerando la intersección de línea con el eje coordenado y.

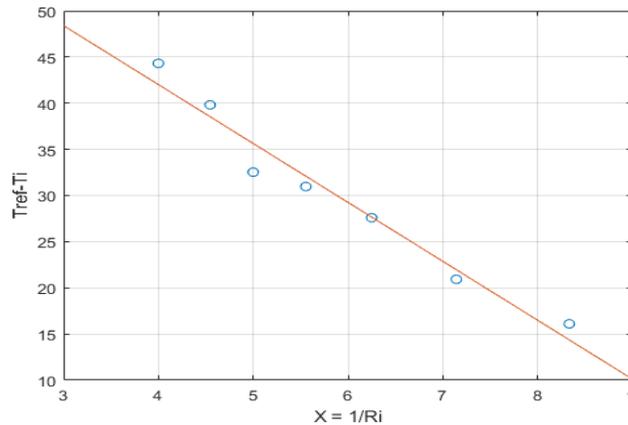


Figura 17: Gráfica datos experimentales aplicando la ecuación (32), para determinar la conductividad térmica.

Para la figura anterior, los círculos azules representan el término  $\frac{1}{R_i}$  en la variación promedio de temperaturas entre cada sensor y el sensor de referencia para la fase estable, y la línea roja representa el ajuste lineal realizado a los datos, de donde se obtiene los valores  $k_u$  y  $k_v$ .

El análisis de los datos experimentales con los que se obtiene el valor de la conductividad de la muestra de material detrítico sedimentario se realiza haciendo uso de Matlab (Anexo 4).

Los valores de  $k_u$  y  $k_v$  obtenidos en las experiencias 1 y 2 se muestran en la Tabla 9.

**Tabla 9: Valores de conductividad térmica  $k_u$  y  $k_v$ .**

		Experiencia 1	Experiencia 2
Pendiente	$[u = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot k_u}]$	$k_u = 0.518$	$k_u = 0.524$
Intersección con el eje y	$[v = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot k_v \cdot R_{ref}}]$	$k_v = 0.409$	$k_v = 0.412$

El resultado de conductividad térmica de la muestra para cada una de las experiencias realizadas se muestra a continuación (Tabla 10):

**Tabla 10: Resultados de las experiencias 1 y 2 para conductividad térmica k.**

Experiencia	$k \left( \frac{W}{m \cdot K} \right)$
1	0.460
2	0.470
Promedio	0.465

En cuanto a la conductividad térmica de la muestra, es relevante destacar que las propiedades térmicas de un material particulado dependen de sus componentes, y varían en función del contenido de agua y aire (Bristow, 1998; Clauser & Huenges, 1995). Puntualmente, los efectos de la humedad y la porosidad del material son muy influyentes cuando de propiedades térmicas se trata (Zhang & Wang, 2017). En concreto, se puede esperar una conductividad térmica más alta para materiales poco porosos saturados de agua y una conductividad más baja para materiales secos con mayor contenido de gas (mayor porosidad).

Considerando esto, y debido a que se decide secar la muestra antes de realizar el experimento, reduciendo así su contenido de agua al mínimo, solo se presentan en el sistema componentes sólidos con contenido de aire entre las partículas. En este sentido, como la conductividad térmica es una de las propiedades térmicas importantes que se sabe que más varía en función del contenido de agua del suelo (Smits et al., 2009), la conductividad térmica de la muestra de estudio es menor a la que se esperaría en condiciones normales (*in situ*).

Para contar con una referencia comparativa, se hace uso de un modelo teórico matemático para obtener un valor teórico de conductividad térmica de suelos naturales secos, propuesto por Johansen (1975):

$$k_{dry} = \frac{0.135 \cdot \rho_b + 64.7}{\rho_s - 0.94 \cdot \rho_b} \quad (38)$$

Donde:

$k_{dry}$  representa la conductividad térmica del suelo seco (W/m·K)

$\rho_s$  representa la densidad promedio de los minerales del suelo (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_b$  representa la densidad del suelo (kg/m<sup>3</sup>)

La porosidad de la muestra es desconocida, pero teniendo en cuenta el material detrítico con el que se realizó el experimento, Sanders (1998) estima la porosidad para arenas finas entre 20% y 50%.

De esta forma, conocida la densidad aproximada de los detritos de la muestra es de 2690 kg/m<sup>3</sup>, se calcula un valor teórico para la conductividad térmica del suelo  $k_{dry}$ , considerando valores de porosidad entre 20% - 50% (Tabla 11):

**Tabla 11: Conductividad teórica  $k_{dry}$  en función de la porosidad de la muestra.**

Porosidad %	Densidad suelo (kg/m <sup>3</sup> )	$k_{dry}$ (W/m·K)
20	2152.0	0.532
25	2017.5	0.425
30	1883.0	0.347
35	1748.5	0.287
40	1614.0	0.241
45	1479.5	0.204
50	1345.0	0.173

Teniendo en cuenta que se considera una porosidad estimada para la muestra de estudio, según los valores otorgados por Sanders (1998), se tiene que los valores teóricos se asemejan al valor experimental para porosidades entre 20% y 25%. Para valores de porosidad mayores a 25% el valor teórico se aleja cada vez más, hasta llegar a una porosidad del 50%, donde la conductividad térmica es muy baja. Además, se debe considerar que, al haber secado el material por 24 horas, es muy posible que se haya eliminado la humedad y la porosidad haya aumentado al máximo nivel. Por otro lado, la porosidad también pudo haber sido modificada al disponer la muestra en el contenedor cilíndrico.

Por tanto, se considera que la variación entre el valor teórico y el experimental obtenido puede deberse a la porosidad de la muestra, al contenido de cuarzo en la muestra y la distribución de tamaños de esta.

De acuerdo a Johansen (1975), en el modelo propuesto la conductividad térmica de suelos naturales considera distintos factores de forma, y las densidades del suelo (considerando porosidad), y de los minerales del suelo. En este sentido, la densidad de los minerales del suelo en promedio es de 2700 kg/m<sup>3</sup>, y varía dentro de límites muy estrechos (alrededor de  $\pm 5\%$ ), por tanto, no hay limitación para usar este modelo, con respecto a la composición mineral. Sin embargo, en el

modelo no se considera la composición de cada mineral presente en la muestra, por lo que se podrían obtener valores de conductividad para muestras que tengan alto contenido de cuarzo.

El cuarzo juega un rol muy importante, porque se puede esperar una conductividad térmica mayor para materiales que tengan un mayor contenido cuarzo (Bristow, 1998; Clauser & Huenges, 1995). Teniendo en cuenta que la muestra contiene un 26.6% de este mineral, este podría ser uno de los principales factores que condicionan que la conductividad térmica de la muestra de material detrítico sea mayor a los valores estimados en función de la porosidad.

En cuanto al tamaño de partícula de la muestra de material detrítico, considerando el análisis granulométrico realizado y la norma ASTM D2487-17 (2017), se está en presencia de un material de suelo grueso. En este sentido, se tiene que las partículas más grandes dan como resultado una mayor conductividad térmica en materiales granulares (Aduda, 1996; Gangadhara Rao & Singh, 1999).

Además de esto, se tiene una muestra con gran variedad de tamaños, en el que se presentan partículas grandes, con un diámetro superior a los 4.75 milímetros, y partículas pequeñas, con un diámetro inferior a los 0.06 milímetros. Según esto, puede formarse una mezcla más densa dentro del sistema, generando una menor porosidad en el mismo (Berg & McGaw, 1977). Así, la densidad seca y la superficie de contacto entre partículas aumenta, del mismo modo que la conductividad térmica de la muestra.

Teniendo en cuenta el material detrítico con el que se está trabajando, como se ha mencionado anteriormente, comúnmente llamado maicillo o suelo arenoso, se realiza una recopilación bibliográfica de los valores de conductividad térmica que proponen diversos autores. En particular, Blackwell & Steele (1989) proporcionan valores de conductividad térmica para suelos arenosos secos en el intervalo de 0.8 a 1.25 (W/m·K), y según la IDAE (2012), la conductividad térmica de arena seca está en el intervalo de 0.3 a 0.8 (W/mK).

Además, según la norma alemana VDI 4640 (2015), el valor mínimo de la conductividad para suelos arenosos secos es de 0.3 (W/m·K) y el máximo de 0.9 (W/m·K), y según la norma suiza SIA 384/6 (2010) el valor mínimo es de 0.4 (W/m·K) y el máximo de 1.0 (W/m·K).

Estos valores bibliográficos, en conjunto con los valores teóricos obtenidos y el valor experimental, se exponen en el gráfico adjunto a continuación (Figura 18):

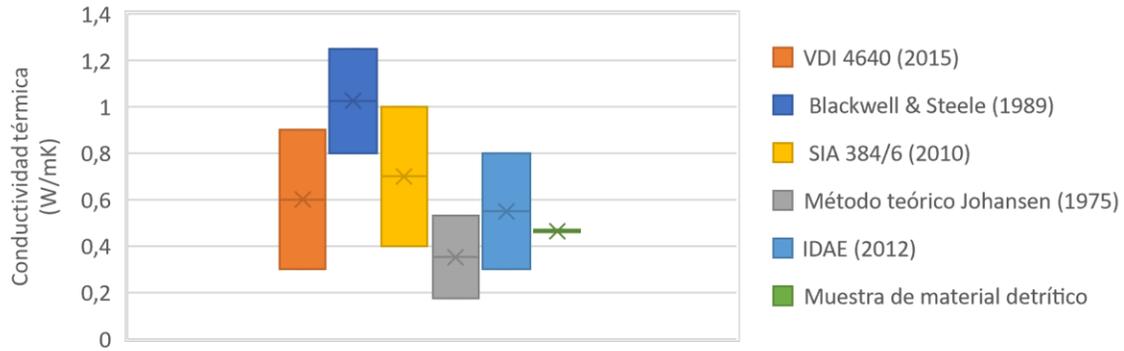


Figura 18: Intervalo de valores bibliográficos de conductividad térmica para suelos arenosos, junto a valor teórico y experimental obtenidos.

#### 4.4 Simulación numérica del experimento

Como última herramienta de análisis, se hace uso del software de simulación de elementos finitos para aplicaciones físicas, COMSOL Multiphysic®, para conformar un modelo 3D axisimétrico de transferencia de calor en medio poroso que reproduce las condiciones del experimento realizado.

Se define previamente un modelo conceptual incorporando la geometría del sistema y las condiciones del experimento. Se considera la conductividad térmica del material detrítico obtenida experimentalmente, las condiciones de temperatura inicial, y las condiciones de contorno.

A continuación, se exponen la geometría del sistema (Tabla 12) y las propiedades físicas del material (Tabla 13).

**Tabla 12: Valores de los parámetros geométricos considerados en el modelo.**

Parámetro	Valor asignado
Radio del recipiente cilíndrico ( $m$ )	0.29
Altura del recipiente cilíndrico ( $m$ )	0.40
Radio de la fuente de calor ( $m$ )	0.0275

**Tabla 13: Valores de las propiedades del material consideradas en el modelo.**

Parámetro	Valor asignado
Conductividad del material ( $\frac{W}{m \cdot K}$ )	0.465
Densidad del material ( $\frac{kg}{m^3}$ )	1883

Para realizar la simulación numérica se considera una porosidad de la muestra de material detrítico del 30%, y considerando que la densidad promedio de los minerales presentes en la muestra era  $2690 \text{ kg/m}^3$ , la densidad de la muestra de material detrítico es de  $1883 \text{ kg/m}^3$ .

Seguido de esto, se plantean las condiciones de borde del sistema. Entre estas, se opta por una condición de borde tipo 3 para representar la convección de calor entre la superficie superior del cilindro y el aire a temperatura ambiente en el exterior. Se considera una temperatura ambiente de  $288.55 \text{ K}$ , valor promedio medido por un sensor de temperatura ubicado fuera el contenedor cilíndrico durante el transcurso de las experiencias, y un coeficiente de convección de  $25 \text{ (W/m}^2\cdot\text{K)}$ , valor típico para el coeficiente de calor por convección, considerando la convección natural del aire (I. Martinez, 1992).

En particular, para la condición de contorno previamente descrita, esta se considera como una buena aproximación de las condiciones reales que se tienen en el sistema. Se podría tener una condición de contorno más precisa, si se realiza el cálculo del coeficiente de convección,  $h$ . Para poder realizar este cálculo es necesario conocer las propiedades termofísicas de los materiales involucrados en la transferencia de calor, la temperatura en la pared curva interna y externa del cilindro, entre otros. Así, aplicando las relaciones empíricas adecuadas para el caso, se puede obtener un cálculo más exacto.

Por otro lado, se considera también una condición de borde tipo 3 para representar el comportamiento del flujo de calor en el borde del contenedor, donde se considera el coeficiente global de transferencia de calor o transmitancia térmica en el sistema, que relaciona las resistencias térmicas del sistema (Figura 19).

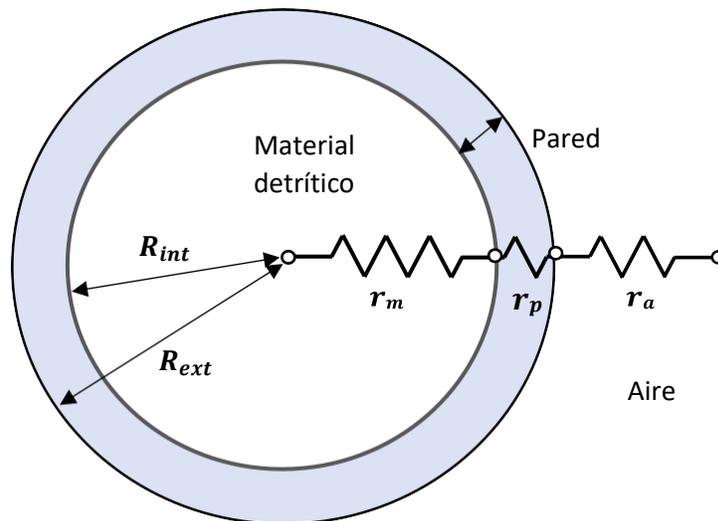


Figura 19: Resistencias térmicas en el sistema simulado.

Para este caso, según Cengel (2016), el cálculo de la transmitancia térmica o coeficiente global de transferencia de calor se define como:

$$U = \frac{1}{r_m + r_p + r_a} \quad (39)$$

Donde:

$U$  representa la transmitancia térmica ( $W/m^2 \cdot K$ )

$r_m$  representa la resistencia térmica del material al interior del contenedor ( $m^2 \cdot K/W$ )

$r_p$  representa la resistencia térmica de la pared del contenedor ( $m^2 \cdot K/W$ )

$r_a$  representa la resistencia térmica del aire en el exterior del contenedor ( $m^2 \cdot K/W$ )

A su vez, estas resistencias térmicas se pueden definir como:

$$r_m = \frac{R_{int}}{k_m} \quad (40)$$

$$r_p = \frac{\ln(R_{ext}/R_{int})}{k_p} \quad (41)$$

$$r_a = \frac{1}{h_a} \quad (42)$$

Donde:

$k_m$  representa la conductividad térmica del material detrítico ( $W/m \cdot K$ )

$R_{ext}$  representa el radio exterior del contenedor (m)

$R_{int}$  representa el radio interior del contenedor (m)

$k_p$  representa la conductividad térmica de la pared cilíndrica ( $W/m \cdot K$ )

$h_a$  representa el coeficiente de transferencia de calor por convección natural del aire ( $W/m^2 \cdot K$ )

Para realizar el cálculo de las distintas resistencias, se consideran los valores expuestos en la Tabla 14 a continuación:

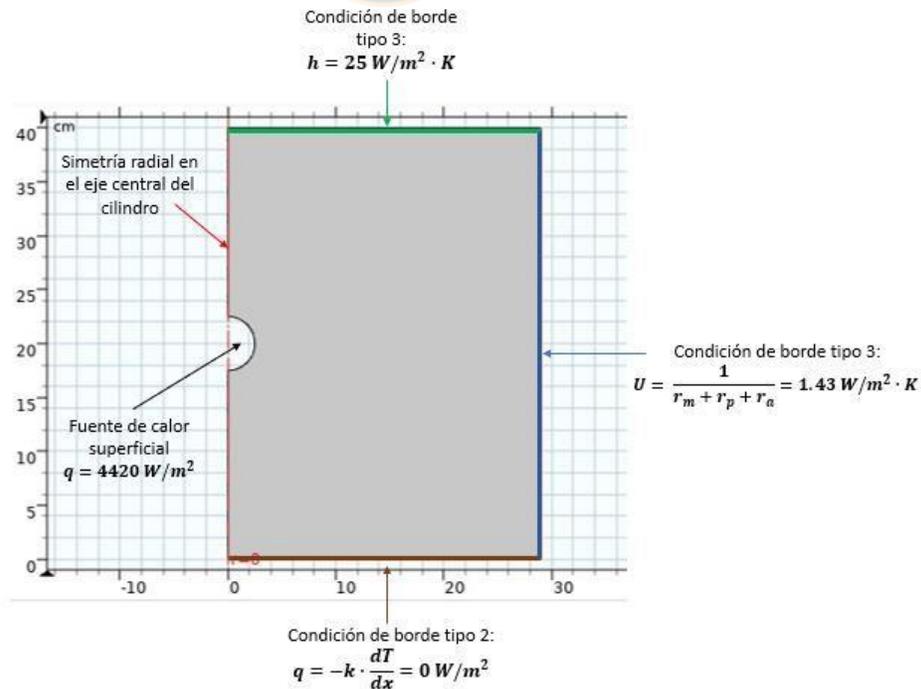
**Tabla 14: Parámetros necesarios para calcular las resistencias térmicas en el sistema.**

Parámetro	Valor asignado
Conductividad térmica material detrítico ( $\frac{W}{m \cdot K}$ )	0.465
Radio exterior del contenedor ( $m$ )	0.293
Radio interno del contenedor ( $m$ )	0.29
Conductividad térmica de la pared cilíndrica ( $\frac{W}{m \cdot K}$ )	0.43
Coefficiente de transferencia de calor por convección natural del aire ( $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ )	25

De esta manera, se obtiene una resistencia del material,  $r_m = 0.634 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ , una resistencia en la pared del contenedor cilíndrico,  $r_p = 0.024 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ , y una resistencia exterior producto del aire,  $r_a = 0.04 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ . Finalmente, se obtiene una transmitancia térmica del sistema,  $U = 1.43 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ .

Por otro lado, para la base del cilindro se considera una condición de tipo 2, en donde el flujo de calor es nulo debido al aislamiento térmico.

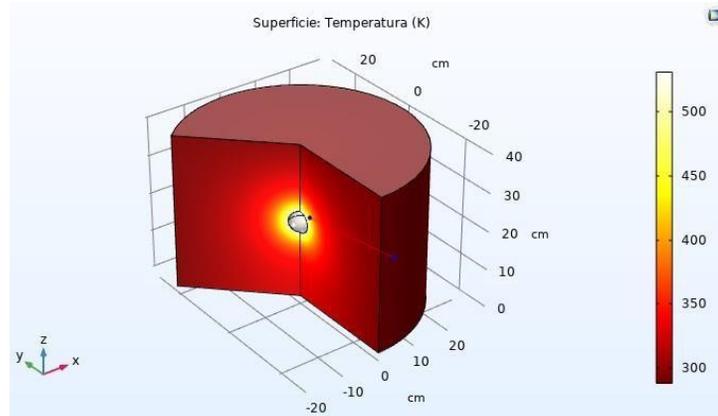
A modo de resumen, las condiciones de borde aplicadas se muestran en la ilustración adjunta a continuación, destacando las ecuaciones y valores representativos en cada caso (Figura 20):



*Figura 20: Condiciones de contorno aplicadas al modelo.*

Como se aprecia en la figura, se posiciona la fuente de calor en el lado izquierdo del sistema, borde que se designa como eje para la realización la axisimetría geométrica, condicionada a los mismos 42 W de potencia, los cuales se distribuyen en un radio de 0.0275 m, medida de la ampolleta utilizada en el experimento. De este modo, la potencia de la fuente de calor se distribuye uniformemente en toda su superficie, generando un flux de calor de 4420 W/m<sup>2</sup>.

Así, se obtiene el modelo de simulación expuesto a continuación (Figura 21):



*Figura 21: Simulación del experimento en COMSOL Multiphysics®.*

Considerando que en el experimento los sensores y la fuente de calor se disponen a la mitad de la altura del cilindro en el plano x-y, resulta conveniente realizar un corte del modelo en este mismo plano (Figura 22), con el fin de analizar el comportamiento de las isotermas a la misma altura a la que están dispuestos los sensores de temperatura en el experimento.

Consiguientemente, se realiza un gráfico que compara la temperatura en condiciones de régimen estacionario en función de la distancia a la fuente de calor en el modelo simulado y en las experiencias 1 y 2 realizadas en este trabajo (Figura 23). Cabe mencionar que la temperatura en cada sensor para las experiencias 1 y 2 es la media de las temperaturas de la fase estable en cada caso.

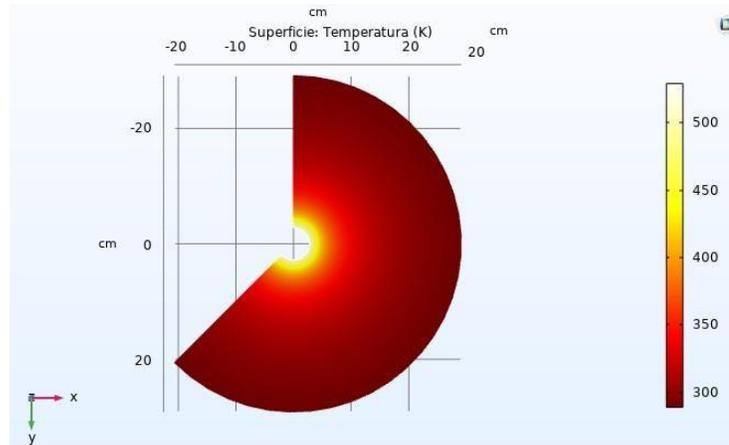


Figura 22: Corte a la mitad del cilindro, con las respectivas temperaturas para un régimen estacionario.

Los resultados experimentales de las temperaturas obtenidas en la fase 2 en cada sensor se comparan con las obtenidas en la simulación. Esta comparación muestra una tendencia general similar, pero la simulación obtiene valores de temperaturas más bajas que en los datos experimentales (simulación 1).

Asumiendo que las medidas experimentales son correctas, se plantea la posibilidad de una subestimación para el coeficiente de conductividad térmica en la simulación realizada y se realiza una serie de simulaciones de calibración variando el valor de la conductividad térmica para evaluar el intervalo de valores que conducen al mejor ajuste de las temperaturas experimentales con las simuladas (simulación 2, considerando distintos valores de  $k$ ).

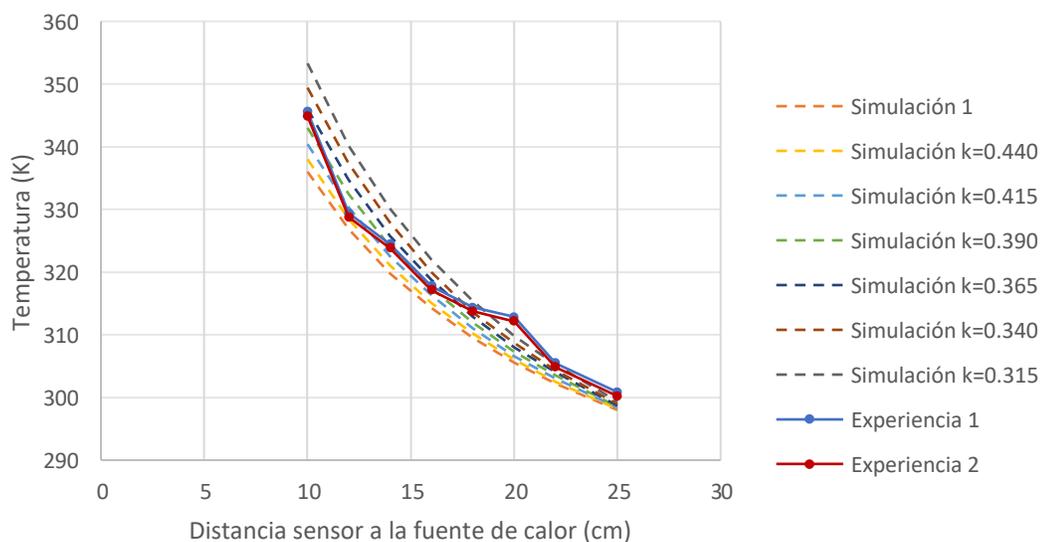


Figura 23: Comparación de temperatura de sensores en experiencias 1, 2, y simulaciones numéricas.

La curva experimental considerada es el promedio de los valores de temperatura de las experiencias 1 y 2.

Considerando lo anterior, se determina el error relativo de cada valor simulado de temperatura con respecto al valor experimental para cada uno de los modelos ejecutados y el error medio (véase Tabla 15).

**Tabla 15: Errores relativos para cada temperatura simulada, con respecto a las temperaturas experimentales.**

sensor (cm)	Valor de $k$ (W/m·K)					
	0.440	0.415	<b>0.390</b>	0.365	0.340	0.315
	Error de calibración (%)					
10	2.0857474	1.390498	0.637312	0.23175	1.21668598	2.346466
12	0.1671478	0.379881	1.018082	1.717064	2.50721775	3.388543
14	0.9409224	0.509024	0.046275	0.478174	1.15687182	1.83557
16	0.7402741	0.362262	0.015751	0.393763	0.80327611	1.433297
18	1.2259194	0.971183	0.684604	0.366184	0.14328929	0.429868
20	2.048	1.888	1.664	1.44	1.216	0.864
22	0.8684254	0.704572	0.540718	0.376864	0.27855153	0.016385
25	0.7818999	0.715355	0.682083	0.615538	0.51572118	0.382632
Promedio	0.8956185	0.740101	<b>0.344566</b>	0.556245	0.71841197	0.685413

El objetivo de la calibración es determinar la curva de temperaturas simuladas que muestre el mejor ajuste con respecto a los valores experimentales obtenidos, de este modo, el mejor ajuste de curvas simuladas con respecto a los datos experimentales se obtiene con un valor de la conductividad térmica de  $k = 0.390 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ , valor menor al obtenido experimentalmente, el cual presenta un error de calibración de 0.345%.

La variación del valor simulado de la conductividad térmica con respecto al valor obtenido experimentalmente se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$V = \frac{|V_{\text{experimental}} - V_{\text{simulado}}| \cdot 100\%}{V_{\text{experimental}}} \quad (43)$$

Donde:

$V$  representa variación relativa (%)

$V_{simulado}$  representa el valor simulado obtenido

$V_{experimental}$  representa el valor experimental obtenido

Finalmente se determina una variación relativa del valor simulado con respecto al valor experimental del 16.1%, siendo el valor de conductividad térmica obtenido experimentalmente,  $k = 0.465 W/m \cdot K$  y el valor teórico simulado,  $k = 0.39 W/m \cdot K$ .



## 5 Conclusiones y recomendaciones

Teniendo en cuenta que el valor promedio de la conductividad térmica de la muestra de material detrítico obtenido experimentalmente se encuentra dentro del intervalo de valores bibliográficos para ese tipo de material, se afirma que el experimento diseñado es adecuado y cumple con los objetivos planteados para determinar la conductividad térmica.

El experimento fue realizado a costo bajo, ya que sólo se gastaron 51799 CLP en su implementación (Tabla 2), valor bastante menor al de los equipos disponibles en el mercado (Tabla 1). Cabe destacar que el costo del experimento no considera el gasto eléctrico que implica tener la fuente de calor encendida durante un periodo de tiempo prolongado.

Es relevante considerar que el valor de la conductividad térmica del material no depende solo de su composición mineralógica, si no que puede verse afectado en gran medida por factores externos, como lo son la presencia de humedad y de aire dentro del sistema, por lo que su valor *in situ* presentará siempre algún grado de variación respecto a los experimentos de laboratorio.

Se obtiene un valor de conductividad térmica experimental  $k = 0.465 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  y un valor teórico simulado  $k = 0.39 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ . Se considera el valor experimental como correcto, existiendo un error relativo de un 16.1% del valor simulado con respecto al valor experimental.

Por otro lado, teniendo en cuenta que en el ambiente mina se tiene a disposición detritos provenientes de la perforación, y materiales no consolidados en el subsuelo, resulta de gran utilidad tener una metodología fiable para la determinación de la conductividad térmica en estos materiales, para una posible aplicación geotérmica.

Además, contar con un valor fiable de la conductividad térmica de los materiales es de utilidad, para cuantificar los requerimientos de ventilación en minas subterráneas. Considerando que el intervalo de valores reportados en literatura es amplio, realizar una estimación adecuada de este valor permitiría optimizar el diseño, lo que conlleva menores costos asociados.

Se destaca que implementar metodologías de bajo costo es particularmente importante para la pequeña y mediana minería, donde se cuenta con presupuestos reducidos.

Asimismo, este tipo de caracterizaciones físicas con aplicación directa en el desarrollo de la geotermia son una alternativa más de mejora en la industria que pueden tener un impacto positivo en su actual búsqueda de fuentes de energía limpias, renovables y sustentables.

Como recomendación, se plantea como una línea futura de estudio realizar experimentos para determinar el efecto de la distribución granulométrica, la porosidad y el contenido de humedad de la muestra en el valor de su conductividad térmica. Además de determinar la porosidad de la muestra experimentalmente.

Por otro lado, para obtener mejores resultados en la simulación numérica, se plantea realizar el cálculo del coeficiente de película mediante relaciones empíricas adecuadas, además de considerar la opción de montar el contenedor sobre una capa de algún material aislante, así se podría asegurar que el flujo hacia la cara inferior del contenedor es nulo.



## 6 Bibliografía

- Abuel-Naga, H. M., & Bergado, D. T. (2005). Thermal conductivity and fabric anisotropy of saturated clays. *Geotechnical Engineering*, 36(2), 99–107.
- Aduda, B. (1996). *Effective thermal conductivity of loose particulate systems*. 31, 6441–6448.
- Allen, A., & Milenic, D. (2003). Low-enthalpy geothermal energy resources from groundwater in fluvioglacial gravels of buried valleys. *Applied Energy*, 74(1–2), 9–19. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(02\)00126-5](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(02)00126-5)
- Alrtimi, A., Rouainia, M., & Haigh, S. (2016). Thermal conductivity of a sandy soil. *Applied Thermal Engineering*, 106, 551–560. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.012>
- American Society for Testing and Materials. (2018). ASTM C-702: Standard practice for reducing samples of aggregate to testing size. *ASTM International*, i, 1–5. <https://doi.org/10.1520/C0702>
- ASTM C177-19. (2019). *Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus*. <https://doi.org/10.1520/C0177-19>
- ASTM D2487-17. (2017). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, [www.astm.org](http://www.astm.org). In *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA* (Vols. D2487-17). <https://doi.org/10.1520/D2487-17>
- ASTM D5334-11. (2011). Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure. In *Annual Book of ASTM Standards* (Vol. 04, Issue November, pp. 6–13). <https://doi.org/10.1520/D5334-0814.2>
- ASTM E1225-04. (2004). Standard test method for thermal conductivity of solids by means of the guarded-comparative-longitudinal heat flow technique. *ASTM International*. <https://doi.org/10.1520/E1225-04>
- Attlin, M. (2010). *Investigation of Geothermal Energy from Mine Water – A Study of the Renström Mine , Boliden*. Royal Institute of Technology in Stockholm.
- Avtar, R., Tripathi, S., Aggarwal, A. K., & Kumar, P. (2019). Population-urbanization-energy nexus: A review. *Resources*, 8(3), 1–21. <https://doi.org/10.3390/resources8030136>
- Balbay, A., & Esen, M. (2010). Experimental investigation of using ground source heat pump system for snow melting on pavements and bridge decks. *Scientific Research and Essays*, 5(24), 3955–3966.
- Balbay, A., & Esen, M. (2013). Distribuições de temperatura no pavimento e ponte lajes aquecidas usando um sistema vertical de bomba de calor derivado da terra. *Acta Scientiarum - Technology*, 35(4), 677–685. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v35i4.15712>

- Berg, R., & McGaw, R. (1977). *Thermal conductivity measurements on New Jersey pavement materials*.
- Bi, J., Zhang, M., Lai, Y., Pei, W., Lu, J., You, Z., & Li, D. (2020). A generalized model for calculating the thermal conductivity of freezing soils based on soil components and frost heave. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119166>
- Bi, Y., Wang, X., Liu, Y., Zhang, H., & Chen, L. (2009). Comprehensive exergy analysis of a ground-source heat pump system for both building heating and cooling modes. *Applied Energy*, 86(12), 2560–2565. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.04.005>
- Blackwell, D., & Steele, J. (1989). Assessment of the geothermal resources of Kansas. *Bull Kans Geol Surv.*, 1, 226:267–95.
- Blázquez, C., Martín, A., García, P., Sánchez, L., & Jiménez, S. (2016). *Analysis of the process of design of a geothermal installation*. 89. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.067>
- Blázquez, C., Martín, A., Nieto, I., & González-Aguilera, D. (2017). Measuring of thermal conductivities of soils and rocks to be used in the calculation of A geothermal installation. *Energies*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/en10060795>
- Boynton, K., Berkley, M., Perkins, S., & Albert-green, S. (2019). Geothermal Energy in Mining - A Renewable and Reliable Energy Solution. *Fuel and Energy Abstracts*, 36(3), 202. [https://doi.org/10.1016/0140-6701\(95\)80556-7](https://doi.org/10.1016/0140-6701(95)80556-7)
- Bristow, K. L. (1998). Measurement of thermal properties and water content of unsaturated sandy soil using dual-probe heat-pulse probes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 89(2), 75–84. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00065-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00065-8)
- Carlsaw, H. S., & Jaeger, J. . (1962). *Conduction of Heat in Solids*. *American Institute of Physics*, second ed. <https://doi.org/10.1063/1.3057871>
- Casas, L. C. (2020). *La utilización de fuentes renovables de energía . Importancia de las fincas agroenergéticas*. March.
- Cengel, Y. A. (2016). *Transferencia de calor y masa* (McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES (Ed.); 3ra. Edici). <https://doi.org/10.1007/BF00129346>
- Chua, K. J., Chou, S. K., & Yang, W. M. (2010). Advances in heat pump systems: A review. *Applied Energy*, 87(12), 3611–3624. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.06.014>
- Clauser, C., & Huenges, E. (1995). *Rock Physics and Phase Relations. A Handbook of Physical Constants* (Issue 1).
- Curtis, R., Lund, J., Sanner, B., Rybach, L., & Hellström, G. (2005). Ground Source Heat Pumps - Geothermal Energy for Anyone, Anywhere: Current Worldwide Activity. *Proceedings World Geothermal Congress 2005, April*, 9.

- de Vries, D. A. (1963). Thermal properties of soils. In *Van Wijk WR (ed) Physics of plant environment* (pp. 210–235). <https://doi.org/10.1002/qj.49709038628>
- de Vries, D. A., & Peck, A. J. (1958). On the Cylindrical Probe Method of Measuring Thermal Conductivity with Special Reference to Soils. II. Analysis of Moisture Effects. *Australian Journal of Physics*, 11(3), 409. <https://doi.org/10.1071/ph580409>
- Díaz-Noriega, R., Fernández, P., & Álvarez, L. (2020). The Challenges of Sustainable Use of Abandoned Underground Flooded Mines as Geothermal Resources. *International Congress on Planning for Closure of Mining Operations, Septiembre*, 7–11.
- Dong, Y., McCartney, J. S., & Lu, N. (2015). Critical Review of Thermal Conductivity Models for Unsaturated Soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33(2), 207–221. <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9843-2>
- Ernst & Young. (2014). Mining: the growing role of renewable energy. *Global Cleantech Center*, 4.
- Esen, M., & Yuksel, T. (2013). Experimental evaluation of using various renewable energy sources for heating a greenhouse. *Energy and Buildings*, 65, 340–351. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.06.018>
- FAO. (2009). Guía para la descripción de suelos. *Organización de Las Naciones Unidas Para La Agricultura y La Alimentación*, 3(4ta edición), 100.
- Farouki, O. (1981). *Thermal properties of soils*.
- Fernández, P., Montes, J., Esteban, G., & García, F. (2013). *Determinación de la influencia del terreno en la valoración técnica y económica de la instalación geotérmica emdiante software EDD y GEO2*. 1–10.
- Flynn, T., Trexler, D., & Hendrix, J. L. (1995). *Application of Geothermal Energy to Mineral Processing: Cyanide Heap-Leaching of Low-Grade Gold Ore*. 16, 277–282. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-79476-6\\_37](https://doi.org/10.1007/978-3-642-79476-6_37)
- Fraga, F., & Martínez-Ageitos, J. (2007). *Energías Renovables: ¿la energía del futuro?*. July 2007, 5–10. <https://doi.org/10.13140/2.1.5163.2325>
- Frasheri, A. (2006). Direct Use of Ground Heat for Space Heating and Cooling , in the Low Enthalpy Geothermal Energy Areas Present a Contribution in Country Energy System. *Geothermal Energy, January*.
- Gangadhara Rao, M. V. B. B., & Singh, D. N. (1999). A generalized relationship to estimate thermal resistivity of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4), 767–773. <https://doi.org/10.1139/t99-037>
- García de la Noceda, C. (2008). Los recursos geotérmicos. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra: Revista de La Asociación Española Para La Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 16(3), 239–247.

- Gehlin, S. (2002). Thermal Response Test. *Lulea University Of Technology*, 1402–1544.
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., & Gorini, R. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*, 24(June 2018), 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>
- Gustafsson, A. (2006). Thermal Response Test - Numerical simulations and analyses. *Luleå University of Technology*.
- Gustafsson, S. E. (1991). Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials. *Review of Scientific Instruments*, 62(3), 797–804. <https://doi.org/10.1063/1.1142087>
- He, H., Zhao, Y., Dyck, M. F., Si, B., Jin, H., Lv, J., & Wang, J. (2017). A modified normalized model for predicting effective soil thermal conductivity. *Acta Geotechnica*, 12(6), 1281–1300. <https://doi.org/10.1007/s11440-017-0563-z>
- Hernández-Calderón, O., Guitiérrez, R., & Zazueta-Niebla, J. (2015). *Heat Transfer during Blanching and Hydrocooling of Broccoli Florets*. October. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13109>
- Holman, J. P. (1998). Transferencia de calor. In C. F. Madrid (Ed.), *Mc graw hill* (Octava edi, Vol. 7, Issue 11). <https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>
- I. Martinez. (1992). Conveccion termica y masica. In *Termodinamica basica y aplicada* (pp. 269–273). [http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/c12/Conveccion termica y masica.pdf](http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/c12/Conveccion%20termica%20y%20masica.pdf)
- IDAE. (2012). *Guía técnica de diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado*.
- Ingersoll, L. R., Zobel, O. J., & Ingersoll, A. C. (1948). *Heat conduction with engineering, geological, and other applications*. [http://www.geothermal-energy.org/geothermal\\_energy/what\\_is\\_geothermal\\_energy\\_greek\\_translation.html](http://www.geothermal-energy.org/geothermal_energy/what_is_geothermal_energy_greek_translation.html)
- Jensen, E. B. (1983). Mine Water Used to Heat Ventilation Air at Henderson Molybdenum Mine. *Society for Mining, Metallurgy & Exploration*, 4.
- Johansen, O. (1975). Thermal Conductivity of Soils, Draft Translation Report 637. *Ph.D. Dissertation, Norwegian University of Science and Technology*, 291.
- Jorand, R., Vogt, C., Marquart, G., & Clauser, C. (2013). *Effective thermal conductivity of heterogeneous rocks from laboratory experiments and numerical modeling*. 118, 5225–5235. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50373>
- Jumikis, A. R. (1978). Thermal Geotechnics. *Soil Science*, 125(6), 393. <https://doi.org/10.1097/00010694-197806000-00010>
- Kagel, A., & Gawell, k. (2005). Promoting Geothermal Energy : Air Emissions Comparison and Externality Analysis Promoting Geothermal Energy : Air Emissions Comparison and Externality Analysis. *The Electricity Journal*, 18(April), 1–19.
- Kern, D. Q. (1999). Procesos de transferencia de calor. In *Procesos de Transferencia de Calor*.

- Kersten, M. S. (1949). Laboratory research for the determination of the thermal properties of soils. *ACFEL, Technical Report 23*, 234. <https://www.worldcat.org/title/laboratory-research-for-the-determination-of-the-thermal-properties-of-soils-final-report-june-1949/oclc/631269131>
- Koufos, K. (2012). *Assessing the potential to implement open loop geothermal systems in Canadian underground mines*. McGill University.
- La Touche, G. D., & Preene, M. (2011). The potential use of ground energy in the mining industry- exploration to closure. *Mine Water - Managing the Challenges: Proceedings of the International Mine Water Association Congress 2011*, 161–166.
- Lahoori, M., Jannot, Y., Rosin-Paumier, S., Boukelia, A., & Masrouri, F. (2020). Measurement of the thermal properties of unsaturated compacted soil by the transfer function estimation method. *Applied Thermal Engineering*, 167(May 2019), 114795. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114795>
- Lamarche, L., Kaji, S., & Beauchamp, B. (2010). A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems. *Geothermics*, 39(2), 187–200. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2010.03.003>
- Leach, A. G. (1993). The thermal conductivity of foams. I: Models for heat conduction. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 26(5), 733–739. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/26/5/003>
- Lefebvre, R., Hockley, D., Smolensky, J., & Geélinas, P. (2001). Multiphase transfer processes in waste rock piles producing acid mine drainage. 1: Conceptual model and system characterization. *Journal of Contaminant Hydrology*, 52(1–4), 137–164. [https://doi.org/10.1016/S0169-7722\(01\)00156-5](https://doi.org/10.1016/S0169-7722(01)00156-5)
- Li, K., Bian, H., Liu, C., Zhang, D., & Yang, Y. (2015). Comparison of geothermal with solar and wind power generation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1464–1474. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.049>
- Lienhard IV, J. H., & Lienhard V, J. H. (2017). *A Heat Transfer Textbook*. In *Phlogiston Press* (fourth edi). <https://doi.org/978-04864793161>
- Línea Verde. (2018). *Energías renovables*.
- Lodhia, S. K. (2018). Mining and sustainable development: Current issues. In *Mining and Sustainable Development: Current Issues*. <https://doi.org/10.4324/9781315121390>
- Low, J. E., Loveridge, F. A., Powrie, W., & Nicholson, D. (2015). A comparison of laboratory and in situ methods to determine soil thermal conductivity for energy foundations and other ground heat exchanger applications. *Acta Geotechnica*, 10(2), 209–218. <https://doi.org/10.1007/s11440-014-0333-0>
- Lu, Y., Lu, S., Horton, R., & Ren, T. (2014). An empirical model for estimating soil thermal conductivity from texture, an empirical model for estimating water content, and bulk density. *Soil Science*

- Society of America Journal*, 78(6), 1859–1868. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.05.0218>
- Lund, J. W., & Boyd, T. L. (2016). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 60, 66–93. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.004>
- Mac-Lean, C., Cabezas, R., Muñoz, M., & Vargas, L. (2018). Applications of low enthalpy geothermal energy: The case of the faculty of physical and mathematical sciences at the University of Chile. *International Journal of Energy Production and Management*, 3(1), 69–78. <https://doi.org/10.2495/EQ-V3-N1-69-78>
- Mapa UDEC — GeoNode Cedeus. (n.d.).
- Mata, F. J., Onisto, L. J., & Vallentyne, J. R. (2012). Consumption: The other side of population for development. *Ethics in Science and Environmental Politics*, 12(1), 15–20. <https://doi.org/10.3354/esep00122>
- Merino, L. (2007). Las energías renovables. *Haya Comunicación*, 20. <http://media1.webgarden.es/files/media1:4befe784280d2.pdf.upl/E.renovables.pdf>
- Ministerio de Energía. (2018). *Informe Final Mesa De Geotermia*. 70.
- Mochlinski, K. (1964). Some industrial measurements of thermal properties of soil. *International Study .Groupon Soils*, 168–178.
- Morgensen, P. (1983). Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storage. *Proceedings of the International Conference on Surface Heat Storage in Theory and Practice, pt 2*, 652–657.
- Mustafa Omer, A. (2008). Ground-source heat pumps systems and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 344–371. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.003>
- Naranjo-Mendoza, C., Wright, A. J., Oyinlola, M. A., & Greenough, R. M. (2018). A comparison of analytical and numerical model predictions of shallow soil temperature variation with experimental measurements. *Geothermics*, 76(April), 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.06.003>
- Navarrete, E. (2010). *Apuntes de Geología Física*.
- Nian, Y., Wang, X., Xie, K., & Cheng, W. (2020). Estimation of ground thermal properties for coaxial BHE through distributed thermal response test. *Renewable Energy*, 152, 1209–1219. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.006>
- Nope, F. I., & de Santiago, C. (2014). *Medida de la conductividad térmica del suelo en laboratorio. Fundamentos físicos, aplicaciones geotérmicas y relaciones con otros parámetros del suelo*. (Vol. 175, Issue January 2014).
- Nowak, W., Sobánski, R., & Kabat, M. (2000). Systems of recruiting and exploiting the geothermal energy. *Szczecin University*.
- Ozyurt, O., & Ekinci, D. A. (2011). Experimental study of vertical ground-source heat pump performance evaluation for cold climate in Turkey. *Applied Energy*, 88(4), 1257–1265.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.046>

- Pahud, D. (2002). *Geothermal energy and heat storage*. Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana.
- Patsa, E., Zyl, D. Van, Zarrouk, S. J., & Arianpoo, N. (2015). Geothermal Energy in Mining Developments : Synergies and Opportunities Throughout a Mine ' s Operational Life Cycle. *World Geothermal Congress 2015, April, 19–25*.  
[https://www.researchgate.net/profile/Sadiq\\_Zarrouk/publication/269395965\\_Geothermal\\_Energy\\_in\\_Mining\\_Developments\\_Synergies\\_and\\_Opportunities\\_Throughout\\_a\\_Mine's\\_Operational\\_Life\\_Cycle/links/5488e4270cf268d28f09009d.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Sadiq_Zarrouk/publication/269395965_Geothermal_Energy_in_Mining_Developments_Synergies_and_Opportunities_Throughout_a_Mine's_Operational_Life_Cycle/links/5488e4270cf268d28f09009d.pdf)
- Pettijohn, F. J. (1975). Sedimentary Rocks, Third Edition. *Geoscience Canada, 2(4)*.
- Popov, Y., Beardsmore, G., Clauser, C., & Roy, S. (2016). ISRM Suggested Methods for Determining Thermal Properties of Rocks from Laboratory Tests at Atmospheric Pressure. *Rock Mechanics and Rock Engineering, 49(10)*, 4179–4207. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1070-5>
- Preene, M., & Younger, P. L. (2014). Can you take the heat? - Geothermal energy in mining. *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology, 123(2)*, 107–118. <https://doi.org/10.1179/1743286314Y.0000000058>
- Progelhof, R. C., Throne, J. L., & Ruetsch, R. R. (1976). Methods for predicting the thermal conductivity of composite systems: A review. *Polymer Engineering and Science, 16(9)*, 615–625. <https://doi.org/10.1002/pen.760160905>
- Rafique, M. M. A. (2015). Modeling and Simulation of Heat Transfer Phenomena. In *Heat Transfer Studies and Applications*. InTech. <https://doi.org/10.5772/61029>
- Raymond, J., & Therrien, R. (2007). Geothermal Energy Resources on Active Mines. *CIM Montreal 2007, June 2015*.
- Raymond, J., Therrien, R., & Hassani, F. (2008). Overview of Geothermal Energy Resources in Québec (Canada). *International Mine Water Association Congress*, 99–100.
- RETScreen International. (2005). Clean energy project analysis: RETScreen engineering and cases textbook. *Natural Resources Canada*.
- Rey-Ronco, M. A., Alonso-Sánchez, T., Coppen-Rodríguez, J., & Castro-García, M. P. (2013). A thermal model and experimental procedure for a point-source approach to determining the thermal properties of drill cuttings. *Journal of Mathematical Chemistry, 51(4)*, 1139–1152. <https://doi.org/10.1007/s10910-012-0097-4>
- Richter, A. (2013). *Minining invests in geothermal project in Argentina to offset fuel cost | Think GeoEnergy - Geothermal Energy News*. <https://www.thinkgeoenergy.com/minining-firm-to-offset-diesel-fuel-cost-at-argentinian-mine-through-geothermal-investment/>
- Roca, I. (2005). *Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta*

- densidad*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Rodriguez, P. (2015). *Caracterización geomecánica y mineralógica del maicillo en la cordillera de Nahuelbuta*. Universidad Católica de la santísima Concepción.
- Rybach, L., & Signorelli, S. (2010). Country Update of Switzerland. *Proceedings World Geothermal Congress, April, 25–29*.
- Rybach, L., & Stegena, L. (1979). *Geothermics and Geothermal Energy*.  
[https://doi.org/10.1016/0016-7142\(80\)90037-x](https://doi.org/10.1016/0016-7142(80)90037-x)
- Saito, T., Hamamoto, S., Mon, E. E., Takemura, T., Saito, H., Komatsu, T., & Moldrup, P. (2014). Thermal properties of boring core samples from the Kanto area, Japan: Development of predictive models for thermal conductivity and diffusivity. *Soils and Foundations*, 54(2), 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.02.004>
- Sanders, L. L. (1998). *A Manual of Field Hydrogeology*.  
[https://books.google.cl/books/about/A\\_Manual\\_of\\_Field\\_Hydrogeology.html?id=23vuAAAAMA AJ&redir\\_esc=y](https://books.google.cl/books/about/A_Manual_of_Field_Hydrogeology.html?id=23vuAAAAMA AJ&redir_esc=y)
- Sanner, B., Mands, E., Sauer, M., & Grundmann, E. (2009). Economic aspects of thermal response test - Advantages, technical improvements, commercial application. *Effstock*, 9.
- Sharqawy, M. H., Mokheimer, E. M., & Badr, H. M. (2009). Effective pipe-to-borehole thermal resistance for vertical ground heat exchangers. *Geothermics*, 38(2), 271–277. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2009.02.001>
- SIA 384/6. (2010). *Sondes géothermiques*. [http://shop.sia.ch/normenwerk/architekt/384-6\\_2010\\_f/F/Product/](http://shop.sia.ch/normenwerk/architekt/384-6_2010_f/F/Product/)
- Signorelli, S., Bassetti, S., Pahud, D., & Kohl, T. (2007). Numerical evaluation of thermal response tests. *Geothermics*, 36(2), 141–166. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2006.10.006>
- Smits, K., Sakaki, T., Limsuwat, A., & Illangasekare, T. H. (2009). Determination of the thermal conductivity of sands under varying moisture, drainage/wetting, and porosity conditions-applications in near-surface soil moisture distribution analysis. *AGU Hydrology Days*, 30(4), 57–65.
- Thermal Properties 9.1*. (2011). 337–372. [https://doi.org/10.1016/S1567-8032\(11\)08009-8](https://doi.org/10.1016/S1567-8032(11)08009-8)
- Toro, K. (2007). *Influencia de las características geológicas en las propiedades geotécticas de granitoides jurásicos y suelos asociados en la ruta 68*. Universidad de Chile.
- Toth, A. (2011). Geothermal Deicing in a Mine Tunnel. *Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University*.
- Trillo, G. L., & Angulo, V. R. (2008). Guía de la Energía Geotérmica. *Universidad Politécnica de Madrid*, 178.
- VDI 4640. (2015). *Thermische Nutzung des Untergrunds - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen*

(Blatt 2). <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4640-blatt-1-thermische-nutzung-des-untergrunds-grundlagen-genehmigungen-umweltaspekte>

- Verhoeven, R., Willems, E., Harcouët-Menou, V., De Boever, E., Hiddes, L., Veld, P. O. t., & Demollin, E. (2014). Minewater 2.0 project in Heerlen the Netherlands: Transformation of a geothermal mine water pilot project into a full scale hybrid sustainable energy infrastructure for heating and cooling. *Energy Procedia*, *46*, 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.158>
- Wieber, G., & Pohl, S. (2008). Mine Water : A Source of Geothermal Energy – Examples from the Rhenish Massif. *International Mine Water Association Congress*, 113–116. [http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDwQFjAA&url=http://www.imwa.info/docs/imwa\\_2008/IMWA2008\\_051\\_Wieber.pdf&ei=J4NZUoSRFqee7AaFqYCYBg&usg=AFQjCNEdwLYXdAJ7ww98RuAZE7InWx8ezg&bvm=bv.53899372,d.Yms](http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDwQFjAA&url=http://www.imwa.info/docs/imwa_2008/IMWA2008_051_Wieber.pdf&ei=J4NZUoSRFqee7AaFqYCYBg&usg=AFQjCNEdwLYXdAJ7ww98RuAZE7InWx8ezg&bvm=bv.53899372,d.Yms)
- Wullschleger, S. D., Cahoon, J. E., Ferguson, J. A., & Oosterhuis, D. M. (1991). SURFTEMP: Simulation of Soil Surface Temperature Using the Energy Balance Equation. *Journal of Agronomic Education*, *20*(1), 11–15. <https://doi.org/10.2134/jae1991.0011>
- Yan, H., He, H., Dyck, M., Jin, H., Li, M., Si, B., & Lv, J. (2019). A generalized model for estimating effective soil thermal conductivity based on the Kasubuchi algorithm. *Geoderma*, *353*(December 2018), 227–242. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.06.031>
- Yao, J., & Likos, W. J. (2017). Transient Plane and Line Source Methods for Soil Thermal Conductivity. *Geotechnical Testing Journal*, *40*(5), 20160333. <https://doi.org/10.1520/GTJ20160333>
- Zhang, N., & Wang, Z. (2017). Review of soil thermal conductivity and predictive models. *International Journal of Thermal Sciences*, *117*, 172–183. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.03.013>

## 7 Anexos

### 7.1 Anexo 1: Especificaciones técnicas de los materiales y equipos utilizados en el experimento.

**Tabla 16: Especificaciones técnicas de los sensores ds18b20 (Maximintegrated, 2019).**

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
Supply Voltage	V <sub>DD</sub>	Local power (Note 1)		+3.0		+5.5	V
Pullup Supply Voltage	V <sub>PU</sub>	Parasite power	(Notes 1, 2)	+3.0		+5.5	V
		Local power		+3.0		V <sub>DD</sub>	
Thermometer Error	t <sub>ERR</sub>	-10°C to +85°C	(Note 3)			±0.5	°C
		-30°C to +100°C				±1	
		-55°C to +125°C				±2	
Input Logic-Low	V <sub>IL</sub>	(Notes 1, 4, 5)		-0.3		+0.8	V
Input Logic-High	V <sub>IH</sub>	Local power	(Notes 1,6)	+2.2		The lower of 5.5 or V <sub>DD</sub> + 0.3	V
		Parasite power		+3.0			
Sink Current	I <sub>L</sub>	V <sub>I/O</sub> = 0.4V		4.0			mA
Standby Current	I <sub>DDS</sub>	(Notes 7, 8)			750	1000	nA
Active Current	I <sub>DD</sub>	V <sub>DD</sub> = 5V (Note 9)			1	1.5	mA
DQ Input Current	I <sub>DQ</sub>	(Note 10)			5		µA
Drift		(Note 11)			±0.2		°C

**Tabla 17: Especificaciones técnicas de la placa programable Arduino UNO (Arduino Official Store, 2020).**

PARAMETER	CONDITIONS
Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V

Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
PWM Digital I/O Pins	6
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Clock Speed	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm
Weight	25 g

**Tabla 18: Especificaciones técnicas del polietileno (Roca, 2005).**

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Alargamiento a la rotura	800	%
Conductividad térmica	0,43	W/Km
Coefficiente de dilatación térmica de 20°C a 50°C	200·10-6	m/m K
Coefficiente de Fricción	0,2	
Densidad	0,95	g/cm <sup>2</sup>
Dureza a la bola		N/mm <sup>2</sup>
Dureza "Shore"	D65	
Módulo de elasticidad	900	N/mm <sup>2</sup>

Punto de fusión	138	°C
Resistencia Superficial	1·1013	-
Resistencia al impacto	No es trenca	KJ/m <sup>2</sup>
Resistencia a la tracción	28	N/mm <sup>2</sup>
Temperatura máxima de uso	80	°C
	110	°C
Temperatura mínima de uso	-100	°C



## 7.2 Anexo 2: Código de medición del experimento (Arduino).

```

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
OneWire ourWire1(2); //Se establece el pin 2 como bus del Sensor 1
OneWire ourWire2(3); //Se establece el pin 3 como bus del Sensor2
OneWire ourWire3(4); //Se establece el pin 4 como bus del Sensor3
OneWire ourWire4(5); //Se establece el pin 5 como bus del Sensor4
OneWire ourWire5(6); //Se establece el pin 6 como bus del Sensor5
OneWire ourWire6(7); //Se establece el pin 7 como bus del Sensor6
OneWire ourWire7(8); //Se establece el pin 8 como bus del Sensor7
OneWire ourWire8(9); //Se establece el pin 9 como bus del Sensor8
OneWire ourWire9(10); //Se establece el pin 10 como bus del Sensor9
OneWire ourWire10(11); //Se establece el pin 11 como bus del Sensor10
DallasTemperature sensors1(&ourWire1); //Se declara una variable u objeto para el Sensor 1
DallasTemperature sensors2(&ourWire2); //Se declara una variable u objeto para el Sensor 2
DallasTemperature sensors3(&ourWire3); //Se declara una variable u objeto para el Sensor 3
DallasTemperature sensors4(&ourWire4); //Se declara una variable u objeto para el Sensor 4
DallasTemperature sensors5(&ourWire5); //Se declara una variable u objeto para el Sensor 5
DallasTemperature sensors6(&ourWire6); //Se declara una variable u objeto para el Sensor 6
DallasTemperature sensors7(&ourWire7); //Se declara una variable u objeto para el Sensor 7
DallasTemperature sensors8(&ourWire8); //Se declara una variable u objeto para el Sensor 8
DallasTemperature sensors9(&ourWire9); //Se declara una variable u objeto para el Sensor 9
DallasTemperature sensors10(&ourWire10); //Se declara una variable u objeto para el Sensor 10
void setup() {
  delay(1000);
  Serial.begin(9600);
  sensors1.begin(); //Se inicia el Sensor 1
  sensors2.begin(); //Se inicia el Sensor 2
  sensors3.begin(); //Se inicia el Sensor 3
  sensors4.begin(); //Se inicia el Sensor 4
  sensors5.begin(); //Se inicia el Sensor 5
  sensors6.begin(); //Se inicia el Sensor 6
  sensors7.begin(); //Se inicia el Sensor 7
  sensors8.begin(); //Se inicia el Sensor 8
  sensors9.begin(); //Se inicia el Sensor 9
  sensors10.begin(); //Se inicia el Sensor 10
}
void loop() {
  sensors1.requestTemperatures(); //Se envía el comando para leer la temperatura
  float temp1= sensors1.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en °C del Sensor1
  sensors2.requestTemperatures(); //Se envía el comando para leer la temperatura
  float temp2= sensors2.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en °C del Sensor2
  sensors3.requestTemperatures(); //Se envía el comando para leer la temperatura
  float temp3= sensors3.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en °C del Sensor3
  sensors4.requestTemperatures(); //Se envía el comando para leer la temperatura
  float temp4= sensors4.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en °C del Sensor4
  sensors5.requestTemperatures(); //Se envía el comando para leer la temperatura
  float temp5= sensors5.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en °C del Sensor5
  sensors6.requestTemperatures(); //Se envía el comando para leer la temperatura
  float temp6= sensors6.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en °C del Sensor6
  sensors7.requestTemperatures(); //Se envía el comando para leer la temperatura

```

```
float temp7= sensors7.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en °C del Sensor7
sensors8.requestTemperatures(); //Se envía el comando para leer la temperatura
float temp8= sensors8.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en °C del Sensor8
sensors9.requestTemperatures(); //Se envía el comando para leer la temperatura
float temp9= sensors9.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en °C del Sensor9
sensors10.requestTemperatures(); //Se envía el comando para leer la temperatura
float temp10= sensors10.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en °C del Sensor10
Serial.print(temp1);
Serial.print("\t");
Serial.print(temp2);
Serial.print("\t");
Serial.print(temp3);
Serial.print("\t");
Serial.print(temp4);
Serial.print("\t");
Serial.print(temp5);
Serial.print("\t");
Serial.print(temp6);
Serial.print("\t");
Serial.print(temp7);
Serial.print("\t");
Serial.print(temp8);
Serial.print("\t");
Serial.print(temp9);
Serial.print("\t");
Serial.print(temp10);
Serial.print("\n");
delay(500);
}
```



### 7.3 Anexo 3: Código de almacenamiento de datos del experimento (Matlab)

```

function varargout = GUI_sensores_temperatura_V2(varargin)
% GUI_SENORES_TEMPERATURA_V2 MATLAB code for
GUI_sensores_temperatura_V2.fig
%     GUI_SENORES_TEMPERATURA_V2, by itself, creates a new
GUI_SENORES_TEMPERATURA_V2 or raises the existing
%     singleton*.
%     H = GUI_SENORES_TEMPERATURA_V2 returns the handle to a new
GUI_SENORES_TEMPERATURA_V2 or the handle to
%     the existing singleton*.
%     GUI_SENORES_TEMPERATURA_V2('CALLBACK',hObject,eventData,handles,.n
..) calls the local
%     function named CALLBACK in GUI_SENORES_TEMPERATURA_V2.M with the
given input arguments.
%     GUI_SENORES_TEMPERATURA_V2('Property','Value',...) creates a new
GUI_SENORES_TEMPERATURA_V2 or raises the
%     existing singleton*. Starting from the left, property value pairs
are
%     applied to the GUI before GUI_sensores_temperatura_V2_OpeningFcn gets
called. An
%     unrecognized property name or invalid value makes property
application
%     stop. All inputs are passed to
GUI_sensores_temperatura_V2_OpeningFcn via varargin.
%     *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%     instance to run (singleton)".
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
% Edit the above text to modify the response to help
GUI_sensores_temperatura_V2
% Last Modified by GUIDE v2.5 22-Aug-2019 04:08:51
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @GUI_sensores_temperatura_V2_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @GUI_sensores_temperatura_V2_OutputFcn,
                  ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT
% --- Executes just before GUI_sensores_temperatura_V2 is made visible.
function GUI_sensores_temperatura_V2_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin command line arguments to GUI_sensores_temperatura_V2 (see
VARARGIN)
% Choose default command line output for GUI_sensores_temperatura_V2
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% Reinicio de Variables globales
clear pserial;
clear val;
clear lectura;
clear stop_flag;
global stop_flag;
stop_flag=false;
% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = GUI_sensores_temperatura_V2_OutputFcn(hObject,
eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;
% --- Executes on button press in read_pushbutton1.
function read_pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to read_pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
%Establecer conexion con puerto COM
global pserial;
pcom='COM4';%Ingresar manualmente puerto COM
delete(instrfind({'Port'},{pcom}))% cierra toda conexion serial con el
puerto COM
pserial = serial(pcom,'BaudRate',9600);% configura la conexion serial
fopen(pserial); % abrir puerto serial
set(handles.text_test,'String',strcat('Conectado con puerto serial :
',pcom));
% Estado de banderas y contadores
global stop_flag;%stop flag
global minr
stop_flag=false;
ii=0; %Contador mediciones
igraph=0; %Contador ploteo
t_save=now;% tiempo de referencia guardado
% tiempo de guardado en minutos
minr=1;
%set(handles.text_test,'String',num2str(stop_flag));
% Ploteo
global lectura
global val
cc=jet(11);
cla
%create a animated line object
h1 = animatedline('DisplayName','Sensor 1 - Ambiente','Color',cc(1',:));

```

```

h2 = animatedline('DisplayName','Sensor 2 - Surf_1','Color',cc(2',:));
h3 = animatedline('DisplayName','Sensor 3 - Surf_2','Color',cc(3',:));
h4 = animatedline('DisplayName','Sensor 4 - Surf_3','Color',cc(4',:));
h5 = animatedline('DisplayName','Sensor 5 - 9 cm','Color',cc(5',:));
h6 = animatedline('DisplayName','Sensor 6 - 12 cm','Color',cc(6',:));
h7 = animatedline('DisplayName','Sensor 7 - 15 cm','Color',cc(7',:));
h8 = animatedline('DisplayName','Sensor 8 - 18 cm','Color',cc(8',:));
h9 = animatedline('DisplayName','Sensor 9 - 20 cm','Color',cc(9',:));
h10 = animatedline('DisplayName','Sensor10 - 25 cm','Color',cc(10',:));
legend('show','Location','northeastoutside');
ax = gca;
ax.YGrid = 'on';
ax.XGrid = 'on';
ax.Position=[0.0231 0.4316 0.5240 0.5442];
ax.Box='on';
xticks=get(gca,'xtick');
set(gca,'xticklabel',cellstr(datestr(xticks)))
% loop
while stop_flag==false
tic;
ii = ii + 1;
igraph=igraph+1;
ylim([-130 150]);
xlim([0 igraph+1]);
%t(ii) = toc;
lectura=fscanf(pserial,'%f');
ahora=now;
val(ii,1)=year(ahora);
val(ii,2)=month(ahora);
val(ii,3)=day(ahora);
val(ii,4)=hour(ahora);
val(ii,5)=minute(ahora);
val(ii,6)=second(ahora);
val(ii,7)=lectura(1,1); %sensor
val(ii,8)=lectura(2,1); %sensor
val(ii,9)=lectura(3,1); %sensor
val(ii,10)=lectura(4,1); %sensor
val(ii,11)=lectura(5,1); %sensor
val(ii,12)=lectura(6,1); %sensor
val(ii,13)=lectura(7,1); %sensor
val(ii,14)=lectura(8,1); %sensor
val(ii,15)=lectura(9,1); %sensor
val(ii,16)=lectura(10,1); %sensor
% Add points to animation
    addpoints(h1,igraph,val(ii,7));           %linea sensor 1
    addpoints(h2,igraph,val(ii,8))           %linea sensor 2
    addpoints(h3,igraph,val(ii,9))           %linea sensor 3
    addpoints(h4,igraph,val(ii,10))          %linea sensor 4
    addpoints(h5,igraph,val(ii,11))          %linea sensor 5
    addpoints(h6,igraph,val(ii,12))          %linea sensor 6
    addpoints(h7,igraph,val(ii,13))          %linea sensor 7
    addpoints(h8,igraph,val(ii,14))          %linea sensor 8
    addpoints(h9,igraph,val(ii,15))          %linea sensor 9
    addpoints(h10,igraph,val(ii,16))         %linea sensor 10
% draw added points

```



```

drawnow
% actualiza cuadros de textos con la temperatura
set(handles.txts1,'String',strcat(num2str(val(ii,7)),' °C'));
set(handles.txts2,'String',strcat(num2str(val(ii,8)),' °C'));
set(handles.txts3,'String',strcat(num2str(val(ii,9)),' °C'));
set(handles.txts4,'String',strcat(num2str(val(ii,10)),' °C'));
set(handles.txts5,'String',strcat(num2str(val(ii,11)),' °C'));
set(handles.txts6,'String',strcat(num2str(val(ii,12)),' °C'));
set(handles.txts7,'String',strcat(num2str(val(ii,13)),' °C'));
set(handles.txts8,'String',strcat(num2str(val(ii,14)),' °C'));
set(handles.txts9,'String',strcat(num2str(val(ii,15)),' °C'));
set(handles.txts10,'String',strcat(num2str(val(ii,16)),' °C'));
%Guardado
if now>t_save+1/24*minr/60
    % guardado en DRIVE
    filename=strcat('C:\Users\jreye\Google
Drive\prueba\','data_sensores_',num2str(day(now)),'-',num2str(month(now)),'-
',num2str(year(now)),'-',num2str(hour(now)),'-
',num2str(minute(now)),'.csv');
    csvwrite(filename,val)
    %guardado en PC LOCAL
    filename22=strcat('data_sensores_',num2str(day(now)),'-
',num2str(month(now)),'-',num2str(year(now)),'-',num2str(hour(now)),'-
',num2str(minute(now)),'.csv');
    csvwrite(filename22,val)
    % reinio de variable de guardado
    t_save=now;
    clear val
    ii=0;
    set(handles.text_test,'String',strcat('Save as ', filename22 ));
end
pause(5-toc)
end
if stop_flag==true
% set(handles.text_test,'String','yes');
    filename=strcat('data_sensores_',num2str(day(now)),'-
',num2str(month(now)),'-',num2str(year(now)),'-',num2str(hour(now)),'-
',num2str(minute(now)),'.csv');
    csvwrite(filename,val)
    fclose(pserial);
end
% --- Executes on button press in stop_pushbutton4.
function stop_pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to stop_pushbutton4 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
global stop_flag;
stop_flag=true;
set(handles.text_test,'String',num2str(stop_flag));
% --- Executes when user attempts to close figure1.
function figure1_CloseRequestFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to figure1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
%Hint: delete(hObject) closes the figure

```

```

delete(hObject);
% -----
function Untitled_1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Untitled_1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% --- Executes on selection change in popupmenu2.
function popupmenu2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns popupmenu2
contents as cell array
%         contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from
popupmenu2
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```



## 7.4 Anexo 4: Código de análisis de datos del experimento (Matlab).

```

clc
cut_inicio=38600;
cut_final=155000;
cut_inicio:cut_final;
Tiempo_1 = linspace(7,38600,155000);
Tamb = dataexperiencia3(cut_inicio:cut_final,2);
Tref = dataexperiencia3(cut_inicio:cut_final,4);
T1= dataexperiencia3(cut_inicio:cut_final,7);
T2 = dataexperiencia3(cut_inicio:cut_final,5);
T3 = dataexperiencia3(cut_inicio:cut_final,8);
T4 = dataexperiencia3(cut_inicio:cut_final,9);
T5 = dataexperiencia3(cut_inicio:cut_final,10);
T6 = dataexperiencia3(cut_inicio:cut_final,3);
T7 = dataexperiencia3(cut_inicio:cut_final,11);
% Gráfico Temperaturas vs Tiempo
figure (22)
x = linspace(-0.1,500,116401);
plot(x,T1);
hold on
plot(x,T2);
hold on
plot(x,T3);
hold on
plot(x,T4);
hold on
plot(x,T5);
hold on
plot(x,T6);
hold on
plot(x,T7);
hold on
plot(x,Tref);
hold on
plot(x,Tamb);
xlabel('Tiempo en horas');
ylabel('Temperatura');
grid on
% Gráfico dT vs 1/R1
Promedio_Tref = mean(Tref);
Promedio_T1 = mean(T1);
Promedio_T2 = mean(T2);
Promedio_T3 = mean(T3);
Promedio_T4 = mean(T4);
Promedio_T5 = mean(T5);
Promedio_T6 = mean(T6);
Promedio_T7 = mean(T7);
Promedios_T =
[Promedio_T7,Promedio_T6,Promedio_T5,Promedio_T4,Promedio_T3,Promedio_T2,Promedio_T1
,Promedio_Tref];

```

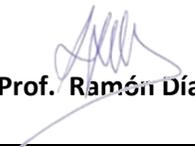
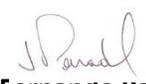
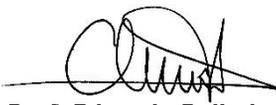
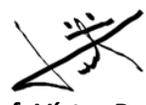


```

Ri = [1/0.12,1/0.14,1/0.16,1/0.18,1/0.20,1/0.22,1/0.25];
dT = [Promedio_Tref-Promedio_T1,Promedio_Tref-Promedio_T2,Promedio_Tref-
Promedio_T3,Promedio_Tref-Promedio_T4,Promedio_Tref-Promedio_T5,Promedio_Tref-
Promedio_T6,Promedio_Tref-Promedio_T7];
% Ajuste 1
Ajuste_1 = polyfit(Ri,dT,1);
u = Ajuste_1(1);
v = Ajuste_1(1,2);
x = linspace(3,9);
y = u.*x + v;
figure(2)
plot(Ri,dT,'o')
hold on
plot(x,y)
grid on
xlabel('X = 1/Ri')
ylabel('Tref-Ti')
% Cálculo de Ku y Kv
P = input('ingrese la potencia de la ampollita en Watts: ');
Rref = input('ingrese la distancia desde la ampollita hacia el sensor de referencia en metros: ');
Ku = (-P)/(4*pi*u);
Kv = P/(4*pi*v*Rref);
k = (Ku+Kv)/2;
formatspect = 'La conductividad térmica Kv es %4.3f W/mK, la conductividad térmica Ku es %4.3f
W/mK y la conductividad térmica K es %4.2f W/mK ';
fprintf(formatspect,Kv,Ku,k)
% Corrección de porosidad (K)
k_aire = 0.03;
porosidad_muestra = 0.35; % averiguar porosidad de la muestra.
K_corregida = (k/((k_aire)^(porosidad_muestra)))^(1/(1-porosidad_muestra))
K_corregida_dos = ((k_aire)^(porosidad_muestra))*k^(1-porosidad_muestra

```

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**Departamento de Ingeniería Metalúrgica**  
 Hoja Resumen Memoria de Título

<b>Título: Determinación experimental de la conductividad térmica en material detrítico</b>		
<b>Nombre Memorista: Tattiana Alexandra Aylece Vásquez Agüero</b>		
<b>Modalidad</b>	<b>Investigación</b>	<b>Profesor (es) Patrocinante (s)</b>
<b>Concepto</b>	Excelente	 Prof. Ramón Díaz N.
<b>Calificación</b>	7	
<b>Fecha</b>	30/9/2020	
 Prof. Fernando Parada		<b>Ingeniero Supervisor:</b>
		<b>Institución:</b>
<b>Comisión (Nombre y Firma)</b>		
 Prof. Eduardo Balladares V.		 Prof. Víctor Parra S.
<b>Resumen</b>		
<p>El presente documento detalla el desarrollo de un experimento realizado utilizando tecnología de bajo costo, con el objetivo de determinar la conductividad térmica en materiales detríticos.</p> <p>La configuración experimental consistió en posicionar una bombilla incandescente de 42 vatios a la mitad de un recipiente cilíndrico con material detrítico en su interior, para luego cubrirla con este mismo material. Se conectó la bombilla y el material detrítico se calentó paulatinamente, midiendo las temperaturas del material con sensores dispuestos radialmente a distancias conocidas en el interior de la muestra. Una vez que las temperaturas se estabilizaron, se determinó la conductividad térmica a partir de los datos experimentales de temperatura, haciendo uso del método de determinación de conductividad térmica de materiales detríticos para un régimen estacionario, propuesto por Rey-Ronco et al. (2011).</p> <p>La medida en tiempo real de temperaturas fue realizada mediante sensores ds18b20, gestionados mediante una placa Arduino, y almacenada en un ordenador portátil. Los datos fueron analizados e interpretados según dos modelos fisicomatemáticos de transferencia de calor por conducción, seleccionados previamente en función de los objetivos propuestos mediante una revisión bibliográfica.</p> <p>El resultado experimental de conductividad térmica obtenido para el material detrítico (0.465 W/m·K) fue comprobado de forma satisfactoria por dos vías. La primera comprobación se realizó mediante la comparación con valores documentados por diferentes investigadores. En segundo lugar, se realizaron simulaciones numéricas con el software COMSOL Multiphysics®.</p> <p>Finalmente, se concluyó que la metodología empleada y la instrumentación de bajo costo seleccionada permiten obtener resultados adecuados en la caracterización de la conductividad térmica de materiales no consolidados y pueden ser empleados con ciertas garantías de confiabilidad con un costo de implementación inferior a 52000 CLP.</p>		