



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

EVALUACIÓN Y APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL
DIMENSIONAMIENTO DE UNA INSTALACIÓN GEOTÉRMICA DE MUY BAJA
ENTALPÍA EN PUNTOS LOCALIZADOS EN TALCA Y MANZANAR

POR: ISABEL DE FÁTIMA FRANCISCO PEDRO

Habilitación profesional presentada al Departamento de Geofísica de la
Universidad de Concepción para optar al título profesional de Geofísica

Profesor guía: Arturo Belmonte Villanueva

08/12/2021

Concepción, Chile

RESUMEN

La energía geotérmica engloba el calor almacenado en rocas, suelos y aguas subterráneas cualquiera sea su temperatura, profundidad y procedencia. Sin embargo, el calor contenido en rocas y suelos es demasiado difuso para ser extraído directamente de forma económica, siendo necesario disponer de un fluido, generalmente agua para transportar el calor hacia la superficie de forma concentrada, mediante sondeos, sondas geotérmicas, colectores horizontales o mediante intercambiadores de calor tierra-aire enterrados a pocos metros de profundidad en el subsuelo.

En este estudio se analizan y desarrollan los fundamentos de la geotermia de muy baja entalpía y su uso en la climatización de edificaciones, se explica el funcionamiento de una bomba de calor y se analiza el procedimiento para la implementación de este proyecto. La metodología de diseño que se utiliza en este trabajo es la international Ground Source Heat Pump association (IGSHPA), este método compone de las necesidades energéticas de la vivienda, elección del tipo de instalación, selección de la bomba de calor, cálculo de la longitud del intercambiador enterrado y análisis cuanto a la factibilidad económica y ambiental.

Se presentan dos ejemplos teóricos para implementar esta tecnología en una vivienda localizada en Talca y una escuela rural en Manzanar, en donde se evalúan de acuerdo con la metodología descrita y se hace una comparación con dos combustibles convencionales la leña y el pellet.

Para concretar con los objetivos de este trabajo se rediseñó la metodología de la siguiente forma: 1) Analizar la tasa de extracción de calor promedio a través de la estratigrafía del terreno y a través del modelo cilíndrico por lo cual es crucial conocer con precisión los materiales de los puntos de estudio; 2) Determinar la profundidad a perforar considerando la tasa de extracción de calor promedio y a través de la longitud de la tubería enterrada. Se concluye que las zonas con alto flujo de aguas subterráneas poseen la tasa de extracción de calor promedio más alta y que la tasa de extracción de calor promedio a través del modelo cilíndrico es más fiable de ser aplicado. De los resultados obtenidos se confirmó que la longitud del intercambiador de calor enterrado depende de la potencia de la bomba de calor y de la diferencia entre la temperatura del terreno y la temperatura mínima del fluido. Cuanto mayor es la potencia de la bomba y menor es la diferencia entre la temperatura del terreno y la temperatura mínima del fluido, mayor será la longitud del intercambiador de calor enterrado, más profundo será el pozo y la posibilidad de que se haga más de una perforación.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a Dios por darme la vida y por la oportunidad de ser cada vez mejor a cada día.

A mi profesor guía Arturo Belmonte por brindarme su apoyo, compartir sus valiosos consejos y ayudarme en el desarrollo de la presente tesis. Al departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción por permitirme desarrollarme como profesional.

A mi familia, especialmente a mi padre por apoyarme, alentarme a seguir adelante y esforzarme para realizar todos mis sueños. A mi madre y hermanos por su apoyo incondicional a lo largo de todos estos años.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	1
1.1.1 Objetivo general	1
1.1.2 Objetivos específicos.....	1
1.2 Geotermia	2
1.2.1 Potencial geotérmico de Chile	3
1.2.1.1 Exploraciones del recurso geotérmico en Chile	5
1.2.1.2 Demanda energética de Chile y el alto consumo de leña para calefacción	6
1.2.2 Aplicaciones de la geotermia	8
1.2.3 Beneficios de la geotermia de baja entalpía	9
1.3 Área de estudio	12
1.3.1 Ubicación	12
1.3.2 El Clima	13
1.3.2.1 Clima de Talca	13
1.3.2.2 Clima de Manzanar	14
1.3.3 ¿Por qué Talca y Manzanar?	15
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1 Propiedades térmicas del terreno	16
2.1.1 Conductividad térmica	16
2.1.2 Capacidad térmica.....	17
2.1.3 Difusividad térmica	18
2.2 Temperatura del subsuelo	18
2.3 Evolución de la temperatura con la profundidad	20
2.4 Transferencia de calor por conducción en sólidos	22
2.5 Bomba de calor geotérmica.....	23
2.5.1 Eficiencia de una bomba de calor geotérmica	27
2.6 Tipos de intercambiadores de calor	28
2.6.1 Sistemas abiertos	28
2.6.2 Sistemas cerrados	29

2.6.2.1	Sistemas horizontales	30
2.6.2.2	Sistemas verticales	31
2.6.3	Elección del fluido circulante	34
2.7	Modelos matemáticos	34
2.7.1	Modelo de fuente lineal	35
2.8	Costos de instalación	37
2.9	Aspectos Legales	39
3.	METODOLOGÍA.....	40
3.1	Cálculo del parámetro specific Heat Extraction (sHE)	41
3.1.1	A través de la estratigrafía del terreno	41
3.1.2	A través de un modelo cilíndrico.....	43
3.2	Cálculo de la profundidad a perforar	44
3.2.1	Considerando la tasa de extracción de calor promedio	44
3.2.1.1	Cálculo de la carga térmica de la vivienda	44
3.2.1.2	Cálculo de la Potencia de suelo	46
3.2.1.3	Cálculo de la profundidad a perforar	46
3.2.2	A través del cálculo de la longitud del intercambiador de calor enterrado	46
3.2.2.1	Temperatura mínima del terreno.....	47
3.2.2.2	Temperatura de entrada y de salida del fluido en la bomba de calor	47
3.2.2.3	Cálculo de la longitud del intercambiador de calor enterrado	49
4.	RESULTADOS	52
4.1	Talca	52
4.1.1	Análisis del cálculo del sHE promedio.....	52
4.1.2	Análisis del cálculo de la profundidad a perforar considerando la tasa de extracción de calor promedio	53
4.1.2.1	Carga térmica de la vivienda	53
4.1.2.2	Selección de la bomba de calor	54
4.1.2.3	Potencia térmica del terreno	55
4.1.3	Análisis de la profundidad a perforar mediante el cálculo de la longitud del intercambiador enterrado	56
4.1.3.1	Temperatura mínima del terreno.....	56
4.1.3.2	Temperatura mínima de entrada del fluido a la bomba de calor	57

4.1.3.3 Cálculo de la resistencia térmica de las tuberías, resistencia del terreno y longitud del Intercambiador Vertical	58
4.2 Manzanar	59
4.2.1 Análisis del cálculo del sHE promedio	60
4.2.2 Análisis de la profundidad a perforar considerando la tasa de extracción de calor promedio	61
4.2.2.1. Carga térmica de la escuela	61
4.2.2.2 Selección de la bomba de calor	61
4.2.2.3 Cálculo de la potencia del suelo	61
4.2.3 Análisis de la profundidad a perforar mediante el cálculo de la longitud del intercambiador enterrado	63
4.2.3.1 Temperatura mínima del terreno.....	63
4.2.3.2 Temperatura mínima de entrada del fluido a la bomba de calor	63
4.2.3.3 Cálculo de la resistencia térmica de las tuberías, resistencia del terreno y longitud del intercambiador vertical	64
5. DISCUSION	66
5.1 Observaciones y análisis general	66
5.2 ¿Realmente vale la pena la geotermia de baja entalpía?.....	68
5.2.1 Estudio económico	68
5.2.2 Estudio ambiental	68
5.2.3 Mi recomendación	69
6. CONCLUSIONES	71
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
8. ANEXOS	75
8.1 Conductividad Térmica y Capacidad Calórica para distintos materiales.....	75
8.2 Estratigrafía.....	77
8.2.1 Perfil estratigráfico este- oeste (Talca)	77
8.2.2 Perfil estratigráfico Manzanar.....	78
8.3 Cálculo de la carga térmica para la vivienda en Talca	78
8.4 Valores de la resistencia térmica de la tubería HDPE PE 100.....	82
8.5 Tabla de la tasa de extracción térmica para captación vertical	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Capas de la Tierra y su espesor en km. Extraído de Freepik, 2021.	2
Figura 1.2: Potencial Geotérmico de Chile. Fuente: Aprender con Energía, 2017.....	4
Figura 1.3: Estudio de usos finales y de curva de oferta de conservación de la energía en el sector residencial de Chile. Fuente: Aprende con energía, 2017.....	7
Figura 1.4: Costos de operación de distintos sistemas de calefacción. Fuente: Ochner, 2010.	10
Figura 1.5: Localización de la ciudad de Talca. Fuente: Conociendo Chile, 2019.	12
Figura 1.6: Localización de la población de Manzanar (en Curacautín). Fuente: jtassara, 2001.	13
Figura 1.7: Diagrama de temperatura anual en Talca. Extraído de climate-data.org, 2019.	14
Figura 1.8: Diagrama de temperatura anual en Manzanar. Extraído de climate-data.org, 2019.	15
Figura 2.1: Variación de la temperatura de la tierra en función de la profundidad a lo largo del año en la ciudad de Valencia (España). Fuente: ATECYR, 2012.	20
Figura 2.2: Perfil de temperatura del pozo inalterado en Talca. Mediciones en inmersión realizado con sondas. Extraído de la tesis de Ochoa, 2019.	21
Figura 2.3: a) Representación de un sistema cilíndrico similar al que se tiene en este estudio. b) Representación de las variables del modelo cilíndrico. Extraído de la tesis de Ochoa, 2019.	23
Figura 2.4: Durante los meses más fríos del año, se recoge el calor del subsuelo y se transfiere al edificio. Extraído de Ferroterm, 2015.....	25
Figura 2.5: Ciclo de una bomba de calor. Extraído de Obras Urbanas, 2016.	27
Figura 2.6: Intercambiador de calor GWHE. Las flechas indican la dirección del flujo de las aguas subterráneas. Fuente: modificado de Florides & Kalogirou, 2007.	29
Figura 2.7: Diagrama de un sistema geotérmico horizontal. Fuente: informe de vigilancia tecnológica, 2017.	31
Figura 2.8: Intercambiador vertical en U. Fuente: Rivas, 2016.	32
Figura 2.9: Representación gráfica del intercambiador vertical doble U. Extraído de la tesis de Ochoa, 2019.....	33
Figura 2.10: Diferentes configuraciones de Intercambiadores de calor cerrado. Fuente: Florides & Kalogirou, 2007.	34

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Generación histórica de los sistemas SIC y SING cuya interconexión hoy conforma el SEN. Extraído de Generadoras Chile, 2021.....	5
Tabla 2. Clasificación del suelo según su entalpia. Extraído de Unidad de Vigilancia Tecnológica, 2017.....	9
Tabla 3. Precios de los principales ítems para la instalación de sistemas de bombas de calor geotérmicas. Extraído de la tesis de David Traverso, 2017.....	38
Tabla 4: Valores típicos de la tasa de extracción para cada sedimento. Fuente: ATECYR, 2013.	41
Tabla 5. Tasa de extracción de calor (sHE) promedio para el pozo con información estratigrafía.	52
Tabla 6: Resultados de las cargas térmicas.	54
Tabla 7: Características de la bomba de calor seleccionada. Fuente: Catálogo CIAT AGEO, 2011.	55
Tabla 8: Profundidad a perforar para diferentes escenarios.	56
Tabla 9: Resistencia térmica de la tubería.....	58
Tabla 10: Dimensionamiento del intercambiador de calor enterrado para Talca.	59
Tabla 11: Tasa de extracción de calor (sHE) promedio para el pozo con información estratigrafía.	60
Tabla 12: Características de la bomba de calor seleccionada. Fuente: Catálogo CIAT AGEO, 2011.	61
Tabla 13: Profundidad a perforar para diferentes escenarios.	62
Tabla 14: Dimensionamiento del intercambiador de calor enterrado para Manzanar.	65
Tabla 15: Valores representativos de conductividad y capacidad térmica para distintos materiales. Extraído de guía técnica de ATECYR, 2013.	75
Tabla 16: Perfil estratigráfico de Talca (perfil este- oeste). Extraído de la tesis Rubio Jaime, 2017.	77
Tabla 17: Perfil estratigráfico de Manzanar. Extraído de Sernageomin, 1991.	78
Tabla 18: Valores de cerramiento. Extraído de la tesis de J.Lopez Lopez, 2014.	79
Tabla 19: Principales características de los tubos. Extraído de la guía técnica ATECYR, 2013.	82
Tabla 20: Valores típicos de la tasa de extracción de calor. Extraído de guía técnica (ATECYR), 2013.	83

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta el objeto de estudio y una breve introducción de lo que es la energía geotérmica, su causa, origen, funcionamiento y sus beneficios.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Diseñar, calcular y evaluar las variables necesarias para el dimensionamiento de una instalación geotérmica de baja entalpía en el área de estudio.

1.1.2 Objetivos específicos

- Diseñar una metodología adecuada para los sistemas estudiados.
- Determinar la tasa de extracción de calor promedio en las áreas de estudio.
- Determinar la profundidad a perforar para las áreas de estudio.
- Hacer un análisis económico y ambiental sobre la tecnología estudiada.

1.2 Geotermia

La geotermia es una palabra de origen griego que significa calor, el calor de la tierra. La geotermia es la rama de la ciencia geofísica que estudia los fenómenos térmicos interno de la tierra. La energía geotérmica es el aprovechamiento de la energía almacenada en forma de calor bajo la superficie de la tierra. La energía geotérmica proviene del flujo de calor que asciende desde el interior de la tierra y en menor medida, de la radiación solar. Esta energía puede aprovecharse para la producción directa de calor para generación de electricidad, para calefacción con bombas de calor geotérmicas y para secado de productos agrícolas, madera, pescado entre otros.

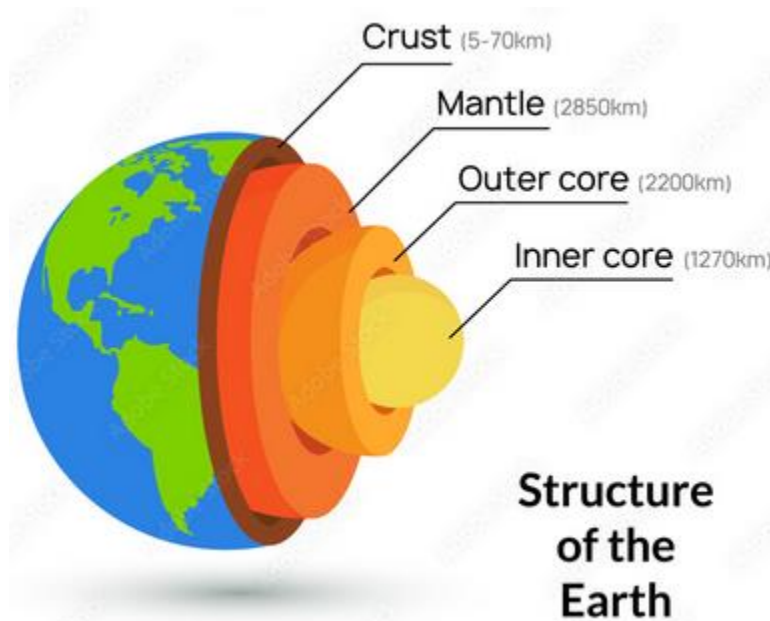


Figura 1.1: Capas de la Tierra y su espesor en km. Extraído de Freepik, 2021.

La energía geotérmica engloba el calor almacenado en rocas, suelos y aguas subterráneas, cualquiera sea su temperatura, profundidad y procedencia. Sin embargo, el calor contenido en rocas y suelos es demasiado difuso para ser extraído directamente de forma económica, siendo necesario disponer de un fluido, generalmente agua, para transportar el calor hacia la superficie de forma concentrada, mediante sondeos, sondas geotérmicas, colectores horizontales o mediante intercambiadores de calor tierra-aire enterrados a poca profundidad en el subsuelo (Llopis y Rodrigo, 2008).

La energía geotérmica se establece en 4 categorías:

- Energía geotérmica de alta entalpía¹ (>150°C): Permite transformar directamente el vapor de agua en energía eléctrica.
- Energía geotérmica de media entalpía (entre 80°C y 150°C): Permite producir energía eléctrica utilizando un fluido de intercambio, que es el que alimenta las centrales.
- Energía geotérmica de baja entalpía (entre 30°C y 80°C): Adecuado para calefacción de edificios y determinados procesos industriales y agrícolas (como secado de papel y frutas).
- Energía geotérmica de muy baja entalpía (<30°C): Puede ser utilizada para calefacción y climatización, necesitando emplear bombas de calor.

La energía geotérmica además de ser proveniente de una fuente inagotable es una energía limpia que no genera consecuencias para el medio ambiente ni para la vida humana. Ella puede ser usada como sistema de calefacción de hogares (viviendas o edificios) disminuyendo efectivamente el alto consumo de leña para calefacción y de este modo aportando en la protección del medio ambiente, además de fomentar la sostenibilidad².

1.2.1 Potencial geotérmico de Chile

La intensa actividad geológica de Chile lo coloca entre los países de alto potencial geotérmico. Chile forma parte del cinturón de fuego del Pacífico, porque frente a sus costas convergen las placas de Nazca y Sudamérica, formando una zona de subducción cuyas consecuencias se evidencian en los más de 200 volcanes activos y los frecuentes terremotos. Esta situación estratégica supone, además, un alto potencial en Chile para la generación de energía eléctrica.

El potencial de energía geotérmica es extenso, pero solo una fracción puede ser utilizada dependiendo de las condiciones geológicas. Chile, al formar parte del cinturón de fuego del Pacífico, contiene un gran potencial geotérmico estimado en 2.000 MW³ en el norte grande

¹ Entalpía es la cantidad de energía térmica que un fluido u objeto puede intercambiar con su entorno. Se expresa en kJ/Kg o Kcal/kg.

² sostenibilidad → es el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones humanas.

³ Watt es una unidad de potencia eléctrica y representa energía por unidad de tiempo (1 Watt=1 Joule/segundo).

y 1.350 MW⁴ en la zona central (según IEA⁵, Geotermia 2018). Durante el año de 2017 se inauguró la primera planta geotérmica de América del Sur con un total de 48 MW.

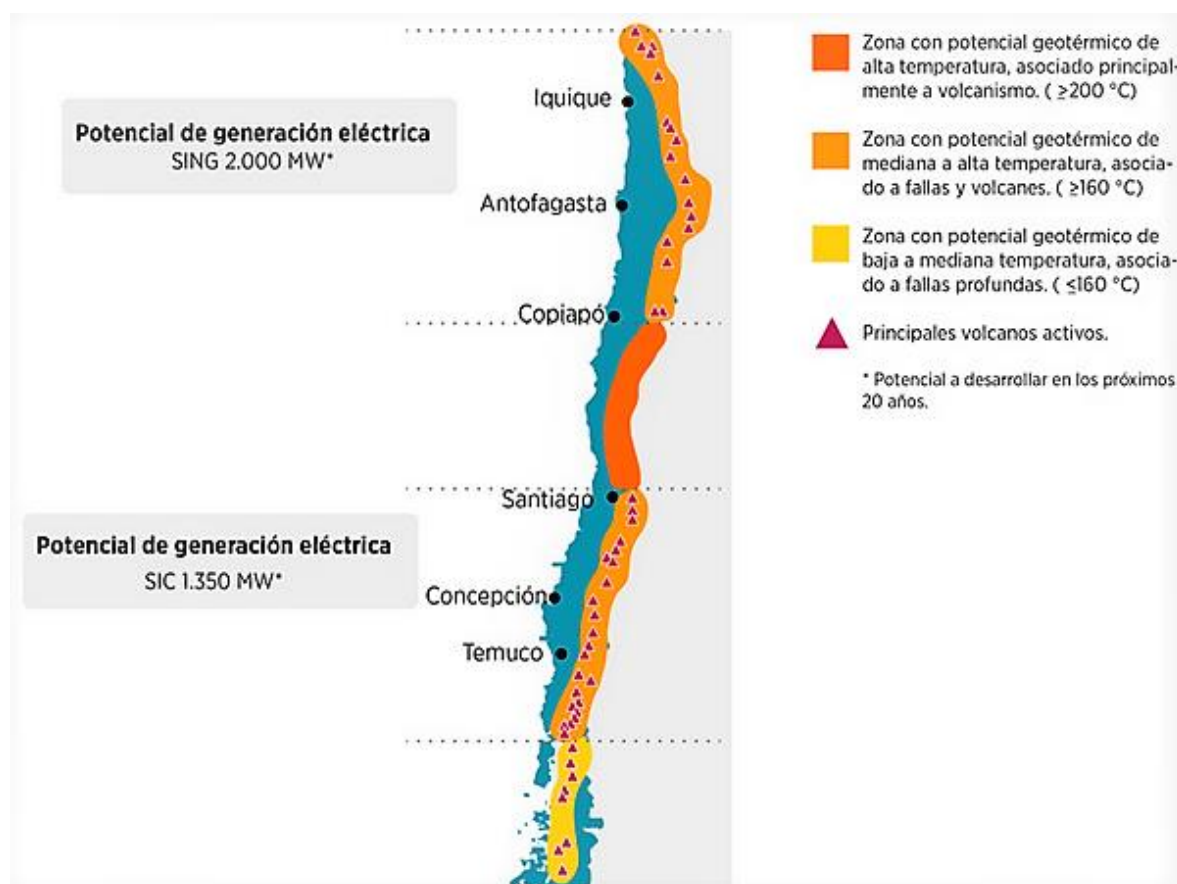


Figura 1.2: Potencial Geotérmico de Chile. Fuente: Aprender con Energía, 2017.

La figura 1.2 muestra el potencial geotérmico de Chile. Se puede observar que las zonas que presentan un color anaranjado más oscuro corresponden a zonas de mayor potencial geotérmico (alta entalpía) y las zonas de color más claro corresponden a zonas de menor potencial geotérmico (baja entalpía). Las siglas SING y SIC⁶ son sistemas independientes chilenos, cuyos significados son: Sistemas interconectado central (SIC) y Sistemas interconectados del Norte Grande (SING).

La tabla 1 muestra la generación histórica de las energías convencionales y no convencionales en Chile en el periodo de 2017 a 2019.

⁴ 1 Mega watt (MW) $\rightarrow$ 1000000 watt.

⁵ IEA $\rightarrow$ Agencia Internacional de Energía.

⁶ Es necesario destacar que las siglas SING y SIC ya no existen por separados actualmente están integrados formando SEN (Sistema Eléctrico Nacional).

Tabla 1: Generación histórica de los sistemas SIC y SING cuya interconexión hoy conforma el SEN. Extraído de Generadoras Chile, 2021.

Generación SEN (GWh)	2017	2018	2019	2019
Hidráulica	21.768	23.218	20.797	20.637
Solar PV + CSP	3.896	5.083	6.347	7.638
Eólica	3.507	3.918	4.812	5.537
Biomasa	2.456	1.669	1.820	1.883
Geotérmica	64	214	202	246
Cogeneración	137	864	130	184
Total renovable	31.691	34.966	34.108	36.125
Carbón	29.407	29.453	28.390	27.008
Gas natural	12.059	10.664	14.131	13.710
Petróleo	845	1.209	683	908
Subtotal no renovable	42.311	41.326	43.204	41.626
Total SEN (GWh)	74.002	76.292	77.312	77.751

1.2.1.1 Exploraciones del recurso geotérmico en Chile

A pesar del gran potencial geotérmico que posee Chile, la energía geotérmica es una de las energías renovable no convencional (ERN⁷) menos conocida, una de las más ignorada y con gran potencial dentro de las ERNC posibles de desarrollar en el país. El alto costo de desarrollo de los proyectos geotérmicos unidos al riesgo existente en toda etapa de exploración y desarrollo de la planta, constituyen una barrera importante para la geotermia.

⁷ ERNC→ energías renovables no convencional.

El desarrollo de la geotermia en Chile es un desafío urgente, puesto que el país requiere de fuentes energéticas locales, limpias, confiables y de largo plazo. Actualmente el país cuenta con recursos fósiles muy limitados, depende de la importación del petróleo y descansa fuertemente en las hidroeléctricas, las cuales han demostrado en ocasiones ser inestables.

Las primeras exploraciones de campos geotérmicos datan de 1921-1922 de manos de una colonia italiana, las que se realizaron en la Región de Antofagasta. Aunque varias exploraciones posteriores llegaron a conclusiones positivas respecto a la factibilidad de aprovechar esta energía, en el país no se han materializado.

Un paso importante fue la promulgación en 2000 de la ley 19.657 de Concesiones de Energía Geotérmica. Con el fin de promover las exploraciones y explotaciones de recursos geotérmicos por parte de empresas privadas, se establecen estas concesiones mediante el Ministerio de Energía. Reglamentos posteriores para la aplicación de esta ley, en especial el aprobado por este Ministerio en 2012, han facilitado la solicitud de concesiones y han hecho más expeditas las posibilidades de explotación.

En marzo de 2017, se iniciaron las pruebas de generación de electricidad y conexión al Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), la primera unidad de la planta geotérmica “Cerro Pabellón”. Cerro Pabellón se ubica en la comuna de Ollagüe, Región de Antofagasta, es el primer proyecto geotérmico de generación eléctrica a escala comercial en Sudamérica y el más alto del mundo, puesto que se instala a 4.500 metros sobre el nivel del mar.

La instalación Cerro Pabellón está compuesta por dos unidades de una potencia instalada bruta de 24 MW cada una y es propiedad de Geotérmica del Norte S.A (GDN), una empresa controlada por Enel green Power Chile (81,7%) y el que participa ENAP (18.3%). La planta geotérmica que inyectará 340 GWH al año al SING, posee la energía necesaria para abastecer a 165 mil hogares y reducir 166 mil toneladas de CO2 anualmente, aportando la lucha contra el cambio climático.

1.2.1.2 Demanda energética de Chile y el alto consumo de leña para calefacción

En Chile, la energía generada a partir de la utilización de biomasa forestal representa el 24% de la matriz de energía primaria (MINERGIA, 2014), el 95% de las viviendas de las regiones del centro-sur de Chile usan leña para calefacción y en algunos casos también para la cocción de alimentos. Como la biomasa es la fuente de energía más barata, no solamente el sector residencial, sino también grandes edificaciones públicas, tales como colegios y hospitales, son calefaccionados con leña.

Un estudio realizado el año de 2010 reveló que en Chile el consumo promedio nacional de energía de una vivienda es de 10.232 kWh/año, incluyendo todos los combustibles y la electricidad. Este alto consumo está fuertemente influido por la utilización de leña en la

zona sur del país, de modo que, si se restara el uso de este combustible, el consumo promedio anual disminuye a 4.470 kWh/año. Esta misma investigación arrojó además que casi la totalidad del uso de leña está destinado a la calefacción.

Mediante una encuesta realizada el año de 2010 a más de 3.220 hogares chilenos, se pudo comprobar que la leña tiene una alta presencia de uso como combustible. En la figura 1.3 se observa el consumo de energía por combustible total en Chile.

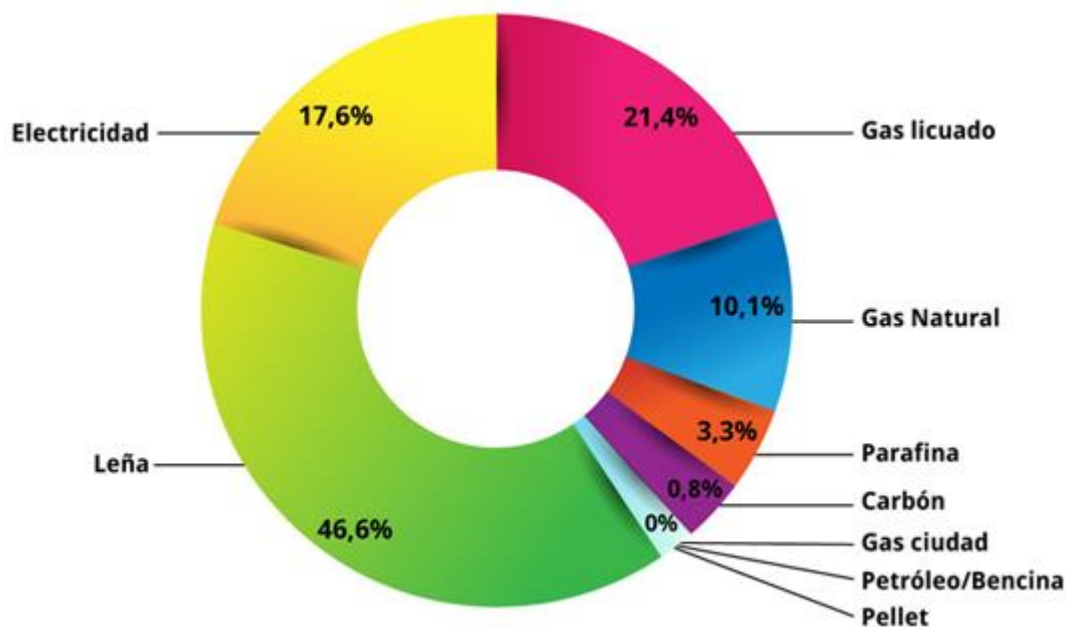


Figura 1.3: Estudio de usos finales y de curva de oferta de conservación de la energía en el sector residencial de Chile. Fuente: Aprende con energía, 2017.

A pesar del alto consumo de leña (en parte debido a su bajo costo), esta práctica ha tenido consecuencias severas para el medio ambiente y para la salud. La contaminación atmosférica se incrementa por el uso de calefactores que permiten la operación en modo de combustión lenta (entrada de aire ahogado). Este tipo de calefacción se usa en la mayoría de los hogares y genera elevadas emisiones de material particulado (MP⁸).

⁸ MP (material particulado) → contaminación por partículas a través del aire. Esas partículas pueden ser de diversos diámetros como por ejemplo MP10 y MP2.5.

Actualmente, las ciudades de Talca, Chillán, Los Ángeles, Temuco, Valdivia y Osorno en el centro-sur de Chile, sufren graves problemas de contaminación atmosférica por material particulado.

1.2.2 Aplicaciones de la geotermia

Las aplicaciones que se pueden dar a un fluido geotermal dependen de su contenido en calor, o lo que es lo mismo, de su entalpía.

No existen aparatos que determinen directamente la entalpía de un fluido en el subsuelo, pero sí existen sondas térmicas que miden la temperatura, y como la entalpía y la temperatura pueden considerarse más o menos proporcionales, la práctica habitual ha generalizado el empleo de las temperaturas de los fluidos geotermiales en lugar de sus contenidos en calor, pues, al fin y al cabo, son las temperaturas las que determinan su futura aplicación industrial.

Las principales aplicaciones de la energía geotérmica son:

- Calefacción en viviendas, edificios públicos y/o privados, naves industriales, etc.
- Refrigeración o aire acondicionado.
- Producción de agua caliente sanitaria.
- Acuicultura.
- Ganadería.
- Climatización de invernaderos.
- Secado o deshidratación de frutas y verduras.
- Secados de madera.
- Procesos de vinificación.

En la tabla 2 se muestran la clasificación del suelo según su entalpía, bien como las aplicaciones más importantes de la energía geotérmica con los rangos de temperatura de utilización.

Tabla 2. Clasificación del suelo según su entalpia. Extraído de Unidad de Vigilancia Tecnológica, 2017.

		Rango de Temperatura en Terreno	Utilización
Muy Baja entalpia	Subsuelo (con o sin agua)	$5^{\circ}\text{C} < T < 30^{\circ}\text{C}$	Calefacción, Climatización
	Aguas Subterráneas	$10^{\circ}\text{C} < T < 22^{\circ}\text{C}$	
Baja Entalpia	Aguas Termales	$22^{\circ}\text{C} < T < 50^{\circ}\text{C}$	Balnearios, Acuicultura
	Zonas Volcánicas	$T < 100^{\circ}\text{C}$	Uso directo del Calor
	Almacenes Sedimentarios Profundos		
Media Entalpia		$100^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$	Generación Eléctrica con Ciclos Binarios
Alta Entalpia		$T > 150^{\circ}\text{C}$	Generación Eléctrica

El enfoque de este proyecto será la energía geotérmica de muy baja entalpía, porque ella estudia lo que ocurre, térmicamente, en los sedimentos superficiales de la corteza terrestre y las aguas subterráneas, principalmente con la finalidad de implementar sistemas de aprovechamiento térmico para uso humano mediante aparatos diseñados exclusivamente para esta finalidad. Estas máquinas se conocen como bombas de calor y se apoyan en principios termodinámicos básicos.

1.2.3 Beneficios de la geotermia de baja entalpía

La energía geotérmica, en general, posee muchas ventajas. Sin embargo, los sistemas geotérmicos de baja entalpía presentan un alto costo de instalación, lo cual constituye una barrera de entrada importante y la hace correr en desventaja frente a los demás sistemas de energía convencionales.

Excluyendo este hecho, se presentan algunas de las muchas ventajas que este sistema de energía posee:

- **Beneficios medio ambientales**

El consumo generalizado de combustibles fósiles genera el consumo de oxígeno y liberación de CO_2 , esto produce un gran aumento en las emisiones de gases que intensifican el efecto invernadero.

El uso de bombas de calor proporciona una herramienta de calefacción que no genera CO_2 en el medio ambiente. Para operar este equipo usualmente se usa electricidad y la resultante final de emisiones de CO_2 dependerá de cómo fue generada dicha electricidad.

- **Costos de operación**

Considerando los costos de los combustibles, los costos de operación de un sistema de calefacción en base a bombas de calor tienen un gasto de operación bastante menor.

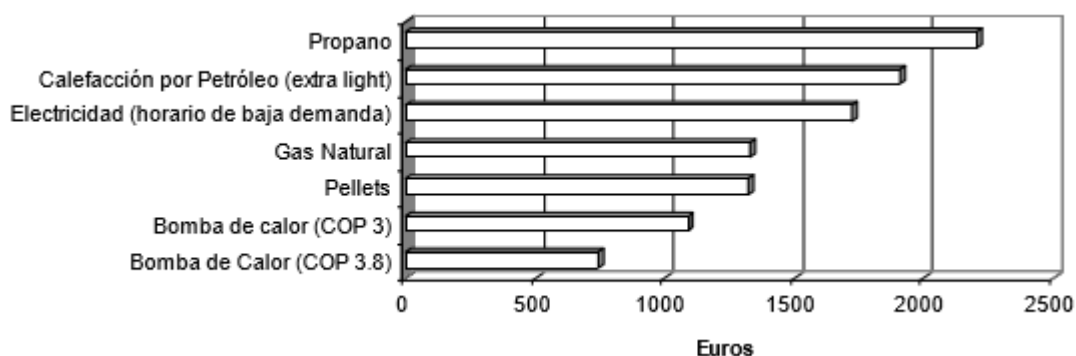


Figura 1.4: Costos de operación de distintos sistemas de calefacción. Fuente: Ochner, 2010.

Los ahorros en las instalaciones con BCGT (Bombas de calor Geotérmica) se generan por el menor consumo de electricidad, por los escasos costes de mantenimiento y por la mayor duración de la vida útil que otros sistemas. Se estima que el ahorro energético en comparación con los sistemas convencionales de calefacción y refrigeración (gas-oíl, gas o electricidad), puede situarse entre 30 y 70%, pues la electricidad que los genera se emplea únicamente para recolectar, concentrar y suministrar el calor, no para producirlo. Así

mismo, la inversión se amortiza en un periodo estimado de entre 6 y 12 años, sin tener en cuenta posibles subvenciones que puedan acortar este plazo.

- **Independencia energética**

Teniendo en cuenta que la energía geotérmica es proveniente de una fuente inagotable y que dicha fuente es independiente de eventuales crisis, comparado con las reservas de petróleo, que se estiman que esas reservas se agoten por completo en 50 años aproximadamente (inferido de datos de la Agencia Nacional de Energía), es fácil reconocer que una peligrosa dependencia de combustibles fósiles no es algo deseable ni conveniente.

Amparado en el eficiente uso de la energía por medio del medio ambiente local, las bombas de calor ayudan a reducir la dependencia de los combustibles fósiles importados.

- **Confort**

Las bombas de calor tienen una operación bastante silenciosa, su operación de baja temperatura en piso radiante evita sobrecalentamientos y turbulencias de aire y polvo, y en los casos de bombas reversibles permiten aportar refrigeración en verano.

- **Rentabilidad**

Las bombas de calor representan la tecnología más moderna existente para calefacción, si existe un mercado local adecuadamente capacitado en su dimensionamiento e implementación, la solución final cada vez representa una mejor opción económica. Si bien los costos de instalación son elevados, los ahorros logrados en la operación permiten obtener un proyecto altamente rentable.

- **No inflamables**

La obtención de calor basada en el ciclo termodinámico sin combustión reduce significativamente la opción de tener algún accidente grave. Adicionalmente, la mayoría de las unidades existentes están usando líquidos refrigerantes no inflamables.

1.3 Área de estudio

1.3.1 Ubicación

El presente estudio se centrará en dos puntos específicos ubicados en la zona sur del país.

El primer punto está localizado en la comuna de Talca (Región del Maule), específicamente está situado en una zona únicamente residencial. El punto en cuestión representa una casa aislada unifamiliar de 115 metros cuadrados que comprende 4 personas en ella.



Figura 1.5: Localización de la ciudad de Talca. Fuente: Conociendo Chile, 2019.

El segundo punto está localizado en el poblado de Manzanar (comuna de Curacautín, región de la Araucanía). Este punto representa una escuela rural en la que se desea instalar calefacción por bombas de calor geotérmica.

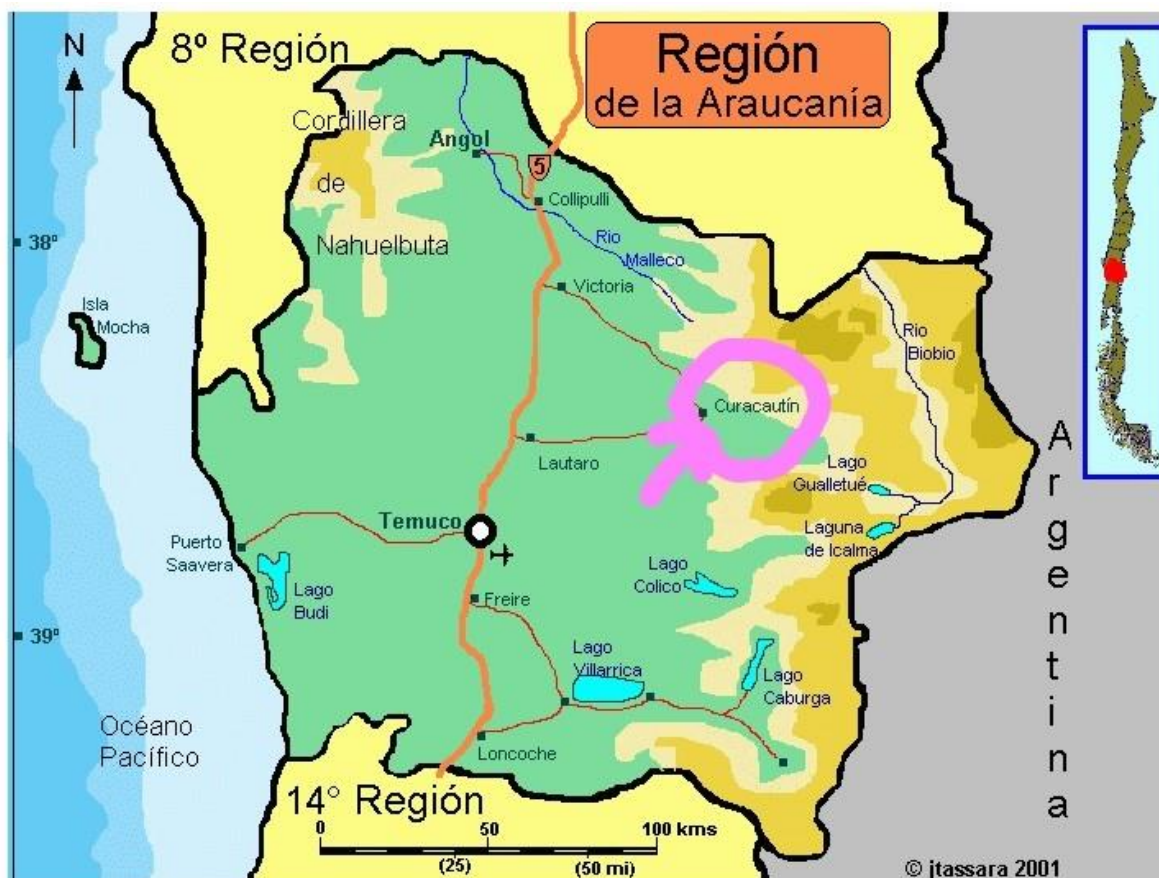


Figura 1.6: Localización de la población de Manzanar (en Curacautín). Fuente: jtassara, 2001.

1.3.2 El Clima

1.3.2.1 Clima de Talca

El clima de Talca se define como mediterráneo con temperaturas templadas, inviernos con una duración de 4 a 5 meses y una moderada oscilación térmica diaria. Los inviernos son fríos, con medidas de temperatura menores a 9°C en junio y julio, mientras que los veranos promedian 20°C. La temperatura promedio anual de Talca es alrededor de 16°C.

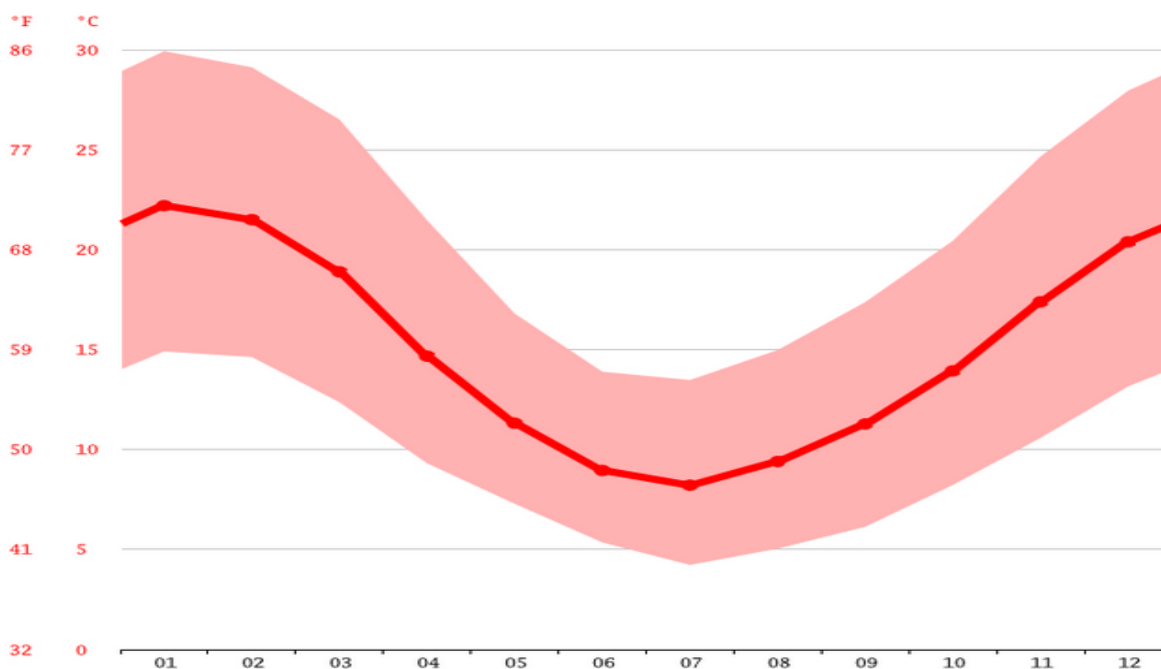


Figura 1.7: Diagrama de temperatura anual en Talca. Extraído de climate-data.org, 2019.

1.3.2.2 Clima de Manzanar

El clima de manzanar es templado y cálido, su temperatura promedio anual es alrededor de 7.5 °C. Es una ciudad marcada con significativas precipitaciones, hay alrededor de 2643 mm de precipitaciones. Inclusive durante el mes más seco (enero) hay precipitaciones de 74 mm (milímetros).

En la siguiente figura se puede apreciar la variación de la temperatura anual en la ciudad de Manzanar durante el año de 2019, durante los meses de verano la temperatura oscila entre 7°C y 20°C y durante los meses de invierno entre -2°C y 10°C.

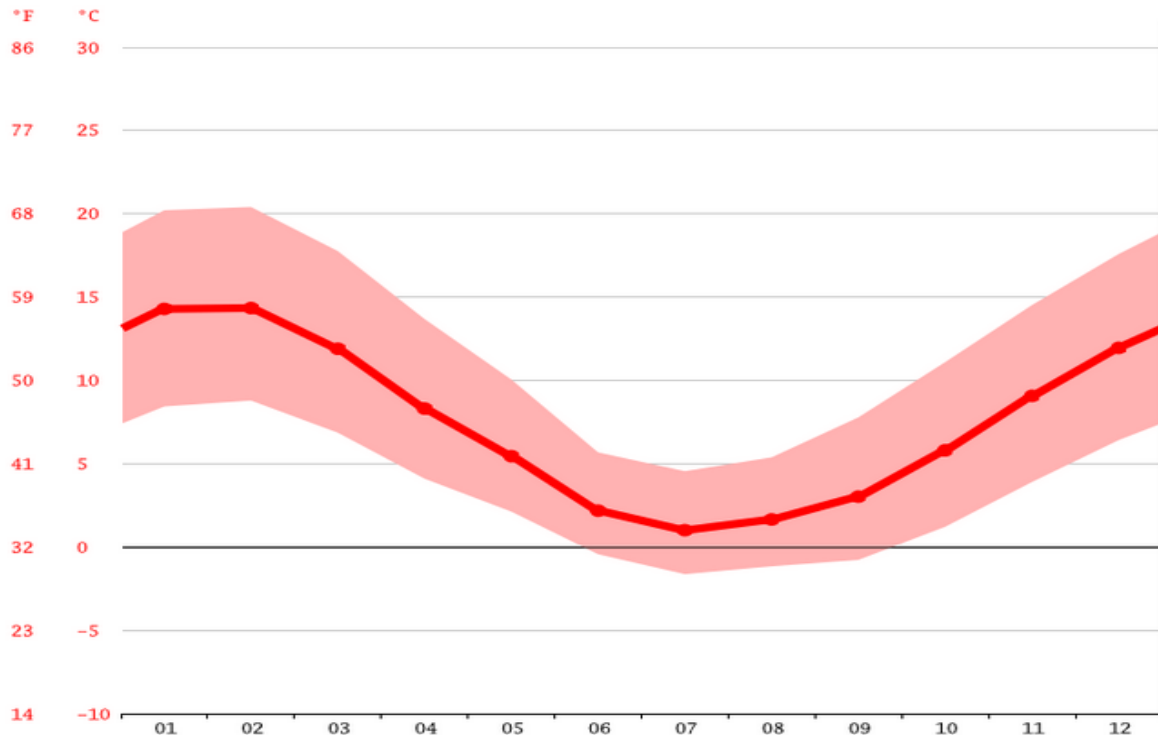


Figura 1.8: Diagrama de temperatura anual en Manzanar. Extraído de climate-data.org, 2019.

1.3.3 ¿Por qué Talca y Manzanar?

En Talca se hizo un estudio en uno de los pozos ubicados en el campus San Miguel de la Universidad Católica del Maule. Este estudio (Ochoa 2018, Ochoa et al. 2018) tenía como objetivo analizar el proceso de enfriamiento de un intercambiador de calor vertical correlacionando esta variación con las resistencias térmicas presentes en el pozo estudiado, el cual fue posible a través del TRT (test de respuesta térmica), que permitió la determinación de las propiedades térmicas del terreno. Disponer del valor de las propiedades térmicas del terreno sirvió de referencia para aplicar la misma tecnología, pero direccionada al dimensionamiento del intercambiador vertical en una vivienda unifamiliar en Talca con objetivo de proporcionar calefacción.

En el caso de Manzanar, a principio se pensaba hacer mediciones geofísicas (velocidad sísmica, geo-eléctrica y gravimetría) y a través de éstas poder correlacionar con la estratigrafía y esta a su vez con los valores de la conductividad térmica. De esta forma es que se decidió replicar el mismo procedimiento de Talca en Manzanar, pero en este caso aplicado a una escuela rural.

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se desarrollan los principales aspectos teóricos que corresponden a la geotermia de muy baja entalpía.

2.1 Propiedades térmicas del terreno

Las propiedades térmicas del suelo son la capacidad calorífica (denotada por C), calor específico (denotado por c), conductividad térmica (denotada por k) y difusividad térmica (denotada por α). Estos varían con el contenido de agua, granulometría⁹ y agregación del suelo.

2.1.1 Conductividad térmica

La conductividad térmica (k) es una propiedad característica de cada material que indica su capacidad para conducir calor. Se puede expresar según la ley de Fourier como el calor que atraviesa en la dirección x un espesor de 1m del material como consecuencia de una diferencia de 1 grado entre los extremos opuestos. Su unidad es $\left[\frac{W}{mK} \right]$.

$$Q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad \text{Ecuación 1}$$

donde k es la conductividad térmica, Q_x es el calor difundido por unidad de tiempo, A el área de la superficie a través de la cual tiene lugar la transmisión de calor, y el cociente dT/dx entre dx representa el gradiente de temperatura.

⁹ Granulometría es el estudio de la distribución estadística de los tamaños de una colección de elementos de un material sólido fraccionado o de un fluido multifásico.

El cálculo de la conductividad térmica para el diseño de un sistema de bomba de calor geotérmico se puede estimar a partir de tablas, medir en laboratorio mediante pruebas de conductividad sobre parte de terreno recogido o determinar realizando una prueba de respuesta térmica del terreno (Thermal Response Test, TRT¹⁰). Este último método es el más fiable y el único recomendado para instalaciones medianas o grandes. Algunos valores más usuales para la conductividad térmica de acuerdo con el tipo de terreno se recogen en la tabla que se puede encontrar en el anexo 8.1.

2.1.2 Capacidad térmica

Se denomina capacidad térmica o calorífica al cociente entre el calor que se suministra a un sistema y la variación de temperatura provocada.

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad \text{Ecuación 2}$$

donde C es la capacidad calorífica o térmica y dQ el calor que es necesario suministrar para incrementar la temperatura dT.

La capacidad térmica del terreno expresa el calor que es capaz de almacenar un volumen de terreno al incrementarse su temperatura, de ahí que se denomina “capacidad” a esta magnitud, pero también de la oposición a dicho cambio de temperatura en la medida en que cuanto mayor sea la capacidad térmica mayor habrá de ser el calor suministrado para lograr la misma variación de temperatura pudiendo hablarse así de cierta inercia térmica¹¹. Su unidad es $\left[\frac{J}{K} \right]$.

Se define la capacidad calorífica específica (calor específico) como $c = \frac{C}{m}$ donde m es la masa y C la capacidad calorífica. Su unidad es $\left[\frac{J}{kg K} \right]$.

¹⁰ TRT es un ensayo que se realiza en terreno con el objetivo de determinar las propiedades térmicas del terreno.

¹¹ La inercia térmica es la propiedad que indica la cantidad de calor que puede conservar un cuerpo y la velocidad con la que cede o absorbe.

2.1.3 Difusividad térmica

La difusividad térmica mide la velocidad a la que la temperatura cambia dentro de una sustancia.

Es una propiedad específica de cada material para caracterizar conducción de calor en condiciones no estacionarias. La difusividad térmica se define como la ratio entre la capacidad de conducción del terreno y la capacidad térmica del terreno. Se mide en $\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right]$.

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad \text{Ecuación 3}$$

donde α es la difusividad térmica, k es la conductividad térmica, ρ es la densidad del material y C_p es el calor específico a presión constante.

La dificultad en la estimación de la difusividad radica en el hecho de que las propiedades físicas tanto intrínsecas como extrínsecas del suelo varían en un amplio rango. El rango de valores para la difusividad térmica, de acuerdo con los trabajos de Labs y Harrington (1982), va desde $0,36 \times 10^{-6} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right]$ hasta $0,8 \times 10^{-6} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right]$, según sea el terreno seco o húmedo, mientras que Givoni y Katz seleccionaron como valores límites $0,4 \times 10^{-6} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right]$ para terrenos secos y $1,08 \times 10^{-6} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right]$ para terreno húmedo.

Un otro rango más frecuente de valores de difusividad utilizados (Andújar et al, 2016) están en el rango de $0,30995 \times 10^{-6} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right]$ y $0,75 \times 10^{-6} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right]$ para gravas secas y saturadas; valores entre $0,34004 \times 10^{-6} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right]$ y $1,72002 \times 10^{-6} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right]$ para arenas secas y saturadas.

Las propiedades térmicas del terreno se pueden determinar mediante fórmulas suponiendo un suelo homogéneo, medidas en laboratorios o realizando una prueba (TRT).

2.2 Temperatura del subsuelo

Existen muchos modelos analíticos y numéricos que pueden ser utilizados para calcular y tratar del problema de la transmisión de calor en el suelo. Kavanaugh (1985), Eskilson (1987), Ingersoll & Plates (1948) y Kusuda & Achenbach (1965) son los más conocidos. Pero para este estudio se utilizará el modelo analítico y numérico de IGSHA (International

Ground Source Heat Pump Association) que utiliza para su modelo el algoritmo de Kusuda & Achenbach de 1965.

Este modelo define la temperatura del terreno en una determinada profundidad y un determinado tiempo como función de la temperatura externa. Existe un desfase temporal entre la temperatura ambiental y la temperatura del suelo y este desfase aumenta con la profundidad.

La temperatura del suelo a una profundidad z y un tiempo t específico viene dada por la siguiente ecuación:

$$T_{\text{suelo}} = T_m - A_s e^{-z \sqrt{\frac{w}{2\alpha}}} \cos \left(wt - \varphi - z \sqrt{\frac{w}{2\alpha}} \right) \quad \text{Ecuación 4}$$

donde,

- T_m = Temperatura promedio anual del aire [°C].
- A_s = Amplitud [°C], corresponde a la semidiferencia entre la máxima y la mínima temperatura anuales.
- t = Coordenadas temporales [s], comenzando desde el 1 de enero a las 00:00.
- w = Frecuencia angular $\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$, es la tasa de cambio de la función, con $w = \frac{2\pi}{T}$, donde T es el periodo de senoide; $T = 365,24 \times 24 \times 3600 = 3.1557 \times 10^7$ [s].
- φ = Fase [rad], definido como el tiempo que tarda a estabilizarse la temperatura del terreno con los cambios de temperaturas exteriores a una determinada profundidad.
- α = Difusividad térmica del suelo $\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$. Se calcula a partir de la densidad, la conductividad térmica y el calor específico del suelo.

Vale destacar que esta ecuación es válida en casos de suelos homogéneos con propiedades térmicas constantes. Este método también no será válido cuando haya recarga de agua subterránea desde cotas más altas o cerca de cuencas de río que aportan un caudal al acuífero. Para estos casos es conveniente emplear otros métodos más eficaces para la medición de temperatura, como TRT, métodos de hidrología convencional, entre otros.

2.3 Evolución de la temperatura con la profundidad

La energía aportada por la radiación solar¹², precipitaciones y otros efectos atmosféricos es transferida diariamente a y desde la superficie de la tierra produciendo un equilibrio térmico. En los primeros 15 metros de profundidad aproximadamente, la temperatura del terreno varía en función de las condiciones climáticas. Por debajo de dicha profundidad y hasta una profundidad de unos 60-80 metros existe una zona neutra en la que la temperatura se mantiene prácticamente constante durante el año, aumentando desde esa profundidad unos 3°C cada 100 m. Por debajo de dicha profundidad suele establecerse ya un gradiente geotérmico claro y la temperatura generalmente se incrementa con la profundidad, aunque puede haber alteraciones zonales relacionadas con las aguas subterráneas por existencia de sistemas kársticos¹³.

Como consecuencia de este equilibrio, la temperatura de la tierra por debajo de ciertas profundidades se mantiene constante y se aproxima a la temperatura media anual del aire en esa determinada zona. La temperatura de la tierra variará dependiendo de la profundidad y de las características del tipo de suelo: conductividad, difusividad y calor específico.

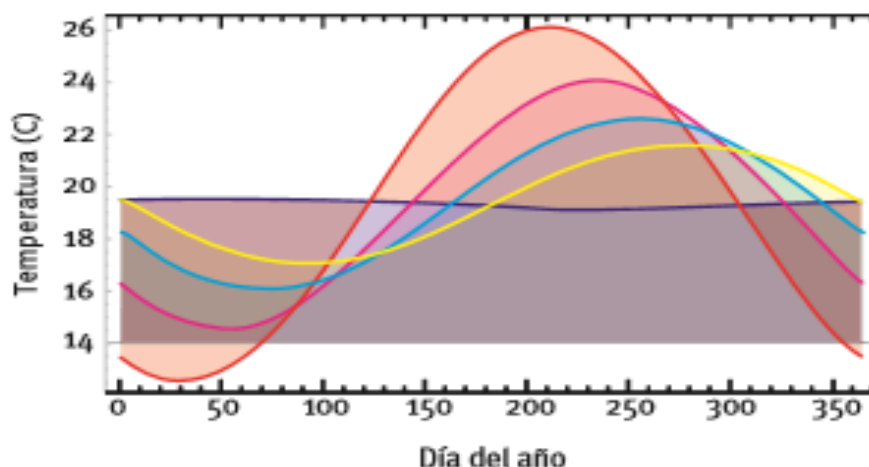


Figura 2.1: Variación de la temperatura de la tierra en función de la profundidad a lo largo del año en la ciudad de Valencia (España). Fuente: ATECYR, 2012.

¹² La radiación solar es la energía emitida por el sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas.

¹³ El relieve kárstico se debe a la erosión de agua en las piedras calizas. Este tipo de relieve se originaron por el arrastre o acumulación de materiales solubles y desintegrados, como los que están constituidos por carbonatos.

La figura 2.1 muestra la evolución estacional de las temperaturas a lo largo de un año para un punto situado a diferentes profundidades bajo la superficie. Las temperaturas y difusividades son típicas de Valencia. Se observa que, a medida que se incrementa la profundidad, la amplitud de las oscilaciones térmicas decrece y sus máximos y mínimos se van desfasando. La curva de color rojo corresponde a la oscilación natural (inmediatamente bajo la superficie), en magenta, azul claro, amarillo y azul oscuro se representa sucesivamente las evoluciones de temperaturas a 1,2,3 y 10 metros respectivamente.

La figura 2.2 muestra la variación de la temperatura del suelo a medida que aumenta la profundidad en uno de los pozos ubicado en el campus San Miguel de la Universidad Católica del Maule en la ciudad de Talca.

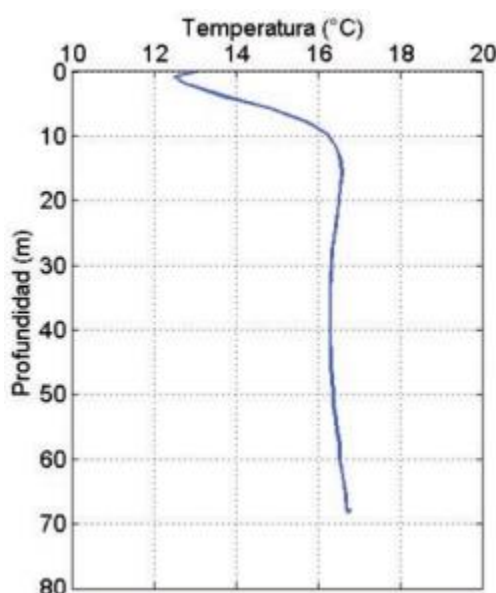


Figura 2.2: Perfil de temperatura del pozo inalterado en Talca. Mediciones en inmersión realizado con sondas. Extraído de la tesis de Ochoa, 2019.

Aquí se muestra el perfil de temperatura del suelo. Durante la inmersión del sensor de temperatura, este varía ampliamente en los primeros 14 metros en un rango de 11,5°C a 16,5°C debido a influencias de las condiciones atmosféricas y a los ciclos diarios, la temperatura se mantiene prácticamente constante entre 25 m a 45 m de profundidad y a partir de esta profundidad empieza a sufrir un ligero aumento hasta los 69 metros.

2.4 Transferencia de calor por conducción en sólidos

El calor puede ser transferido de un medio a otro a través de los siguientes procesos: conducción, cuando la transmisión es por contacto; convección, cuando ocurre transferencia de materia; radiación, cuando la transmisión de energía es por medio de emisión de ondas electromagnéticas o fotones. Para el caso de estudio se considera solamente la transferencia de calor por conducción.

La transferencia de energía en forma de calor por conducción es un proceso de transmisión de calor basado en el contacto directo entre los cuerpos, sin intercambio de materia, porque el calor fluye desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura que está en contacto con el primero.

La conducción térmica está determinada por la ley de Fourier (Joseph Fourier). Esta ley permite cuantificar el flujo de calor conducido a través de un cierto material sólido (Banks, 2012), la cual puede ser expresada mediante la ecuación 1 (ver sección 2.1.1.1).

Tratándose de intercambiadores de calor enterrado (tuberías en forma cilíndrica), se adaptará la ecuación 1 considerando el caso del estudio como el caso de un modelo cilíndrico. Para este caso se considerará el espesor de la tubería, el espesor del relleno del pozo y el ancho del terreno que limita con el borde el pozo. Considerando estos aspectos la ecuación será expresada como:

$$q = \frac{2\pi L(T_1 - T_4)}{\left(\frac{1}{k_a}\right)\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \left(\frac{1}{k_b}\right)\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \left(\frac{1}{k_c}\right)\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)} \quad \text{Ecuación 5}$$

donde,

- q = Flujo de calor en el sistema [W].
- L =Largo del cilindro (pozo) [m].
- $sHE_{moCilindro} = \frac{q}{L}$; es la tasa de tasa de extracción de calor por metro lineal $\left[\frac{W}{m}\right]$.
- k_a = Conductividad térmica de la tubería $\left[\frac{W}{mK}\right]$.
- k_b = Conductividad térmica del relleno del pozo $\left[\frac{W}{mK}\right]$.
- k_c = Conductividad térmica del terreno $\left[\frac{W}{mK}\right]$.
- T_1 = Temperatura del agua en el interior del cilindro [$^{\circ}C$ o K].
- T_4 = Temperatura del medio sin perturbar [$^{\circ}C$ o K].
- r_1 = Distancia desde el centro del sistema al borde interior de la primera capa [m].

- r_2 = Distancia entre el centro del sistema hasta el borde externo de la primera capa [m].
- r_3 = Distancia entre el centro del sistema y el borde externo de la segunda capa [m].
- r_4 = Distancia que existe entre el centro del cilindro y el punto que se encuentra sin ser afectado por los cambios que ocurran en éste [m].

En las siguientes figuras se puede apreciar la representación de un sistema similar al objeto de estudio y la representación de las variables que lo comprenden.

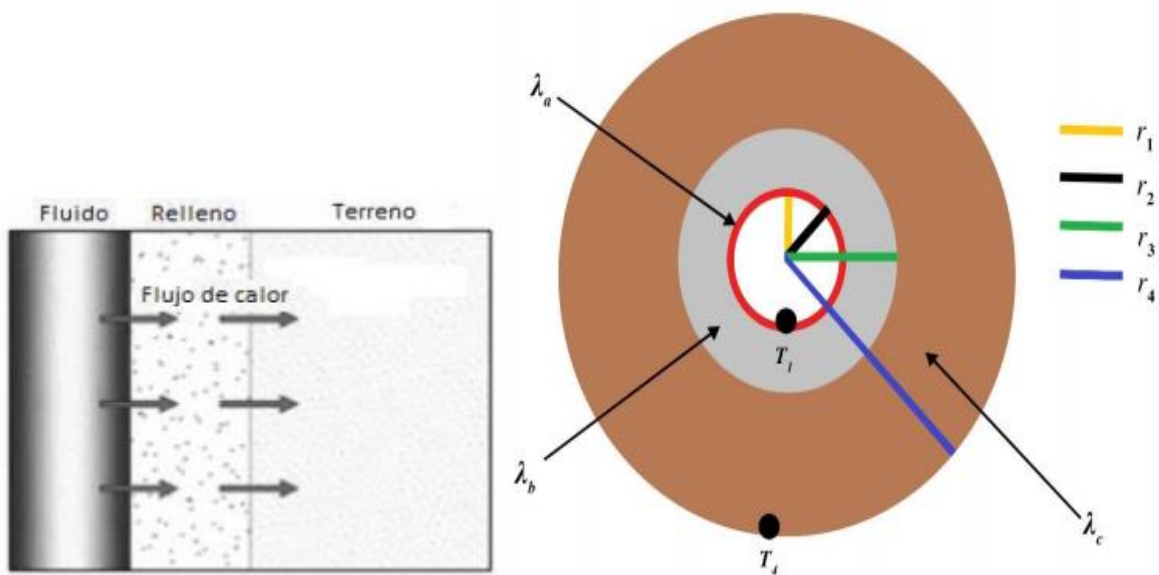


Figura 2.3: a) Representación de un sistema cilíndrico similar al que se tiene en este estudio. b) Representación de las variables del modelo cilíndrico. Extraído de la tesis de Ochoa, 2019.

2.5 Bomba de calor geotérmica

Cuando la temperatura del fluido geotérmico no alcanza los niveles de temperatura superiores a 50°C, la única posibilidad de suministrar calefacción a los locales consiste en la utilización de los sistemas de Bombas de Calor Geotérmicas (GSHP¹⁴) (IGSHPA, 2012). De

¹⁴ GSHP→ Ground Source Heat Pumps.

esta forma, los recursos geotérmicos de muy baja entalpía, incluyendo los acuíferos¹⁵ convencionales con aguas a temperaturas del orden de 15-20°C, pueden ser aprovechados para la calefacción de locales y viviendas con sistemas modernos que no utilizan temperaturas en el circuito de calefacción tan elevadas como antiguamente.

Los sistemas GSHP se conforman de tres componentes: el circuito de intercambiadores de calor (circuito primario), una bomba de calor geotérmica y el sistema de distribución de energía interior (circuito secundario). Los intercambiadores conducen el fluido que absorbe el calor del subsuelo, llevando la energía geotérmica a través de tuberías, para luego acoplarse a una bomba de calor convencional, y así cambiar la temperatura a aquella requerida por el sistema de distribución de energía para climatización de ambientes. Este último circuito es una red cerrada de tuberías con fluido, incrustada en el suelo y en las paredes de la edificación.

La bomba de calor es un dispositivo eléctrico que, mediante un compresor y un ciclo de refrigeración “bombea” calor desde una zona de menor temperatura a una de mayor temperatura, utilizando una cantidad de trabajo relativamente pequeña.

En una vivienda actual se pueden tener los siguientes requerimientos de temperaturas:

- Mayor a 60° C para calentar agua sanitaria.
- 45°C a 55°C para un sistema de calefacción central, con una gran superficie de radiadores.
- 30° C a 45°C para un sistema de calefacción por losa radiante.
- 25°C a 30°C si usamos aire cálido como medio de calefacción.

La bomba de calor está compuesta por los siguientes componentes, quienes se encargan de llevar a cabo todo el proceso:

- Compresor: El trabajo del compresor es el desarrollo del proceso, este requiere de electricidad para poder funcionar. A su vez, es el componente que requiere de la mayor parte del consumo de energía eléctrica.
- Condensador: Es el intercambiador de calor situado al lado del calderín y a través del cual el fluido refrigerante en forma de vapor cede toda su energía al agua del depósito. A medida que va cediendo la energía, condensa y vuelve a estado líquido.

¹⁵ El acuífero es una formación geológica formada por una o más capas de roca, situada en una zona saturada capaz de almacenar y permitir la circulación de agua subterránea en sus poros o grietas.

- Válvula de expansión: Por este componente del circuito cerrado pasa el fluido refrigerante y que, gracias a su cambio de sección, logra la reducción de una forma brusca de la presión y a su vez un descenso bastante notable de la temperatura.
- Evaporador: Este componente se encuentra en la parte superior de la misma y permite el intercambio entre el fluido refrigerante y la fuente del calor (subsuelo en este caso) y se convierte en forma de vapor. Esto es posible ya que cuenta con una superficie ampliada por un sistema de aletas.

En la figura 2.4 vemos cómo ocurre la distribución del calor desde la fuente fría hasta el edificio.



Figura 2.4: Durante los meses más fríos del año, se recoge el calor del subsuelo y se transfiere al edificio. Extraído de Ferroterm, 2015.

A continuación, se detalla el funcionamiento de una bomba de calor geotérmica (ver figura 2.5) en modo calefacción:

1. El fluido calor portador sale del evaporador a temperatura muy baja y circula por las sondas dentro de los pozos geotérmicos. Durante este proceso, la temperatura del terreno está entre 12° y 17° C (dependiendo de la ubicación) cede calor a las sondas haciendo con que este regrese al evaporador a unos 3 o 5 grados más caliente (esta es la energía geotérmica que absorbemos del terreno).
2. Al tener más temperatura el fluido cede calor al refrigerante que circula y provoca que este se evapore al calentarse y se transforme en un gas más frío.
3. Este refrigerante es absorbido por el compresor, que al comprimirlo este aumenta su temperatura, su presión y se convierte en un gas caliente.
4. Seguidamente, el gas caliente pasa por el condensador que es el protagonista encargado de transferir el calor producido por la bomba de calor al sistema de calefacción y/o agua caliente. Al utilizar el calor el gas libera temperatura y pasa al estado líquido de esta forma destina el calor a realizar las distintas funciones asignadas al sistema.
5. Finalmente, el líquido templado pasa por la válvula de expansión donde se reduce su temperatura y presión para volver al punto de partida.

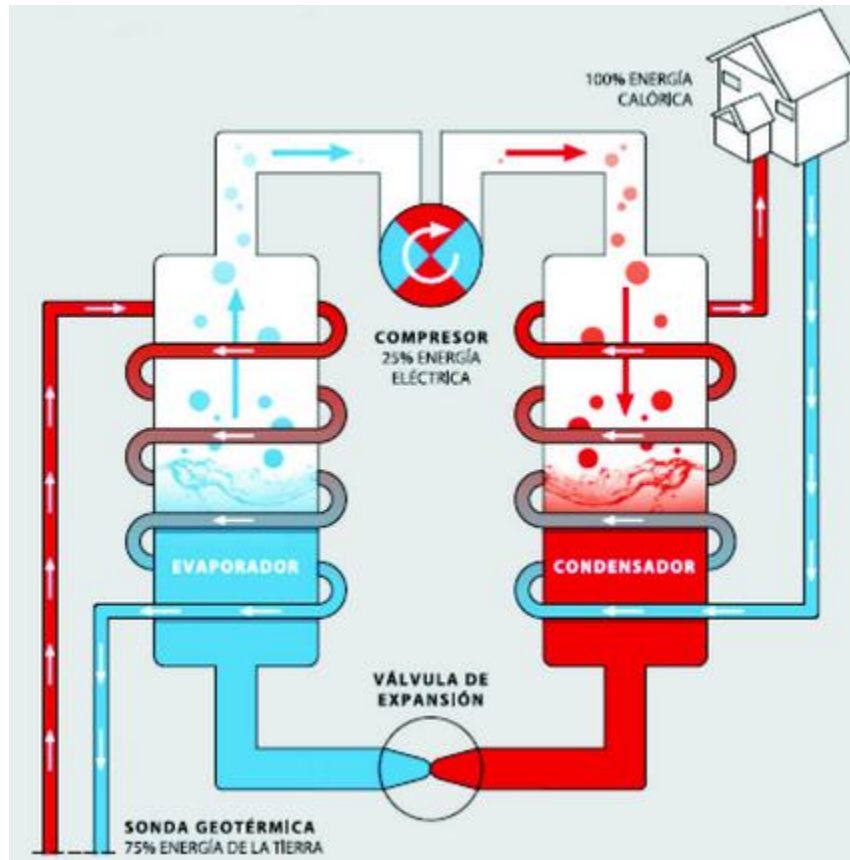


Figura 2.5: Ciclo de una bomba de calor. Extraído de Obras Urbanas, 2016.

Cuando la bomba de calor opera en modo de calefacción, una buena parte del calor que se utiliza en la aplicación es calor extraído directamente del sol que previamente ha sido almacenado por el subsuelo. La parte de calor que proviene del gradiente geotérmico del subsuelo, es decir, del interior de la tierra, representa un mayor o menor porcentaje en función de las diferentes tipologías de intercambiador de calor enterrado, siendo relativamente pequeña o incluso nula en los sistemas horizontales y más o menos importantes, según su emplazamiento, en los sistemas verticales.

2.5.1 Eficiencia de una bomba de calor geotérmica

El coeficiente de rendimiento (COP, por sus siglas en inglés) se refiere a la razón obtenida entre el calentamiento que proporciona una bomba de calor (Q_{TOTAL}) y la electricidad consumida para generarlo (W_{TOTAL}), energía que en gran parte es utilizada por el compresor de la bomba de calor.

$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{TOTAL}}}{W_{\text{TOTAL}}}$$

Ecuación 6

$$Q_{\text{TOTAL}} = Q_{\text{SUELO}} + W_{\text{TOTAL}}$$

Ecuación 7

donde,

- Q_{TOTAL} = Potencia térmica total [W].
- W_{TOTAL} = Electricidad consumida para generarlo [W].
- Q_{SUELO} = Potencia térmica del terreno [W].

En una bomba de calor el COP es mayor a 1, una bomba de calor debe alcanzar un COP entre 2 y 6 para que tenga una correcta funcionalidad y eficiencia entre ambas temperaturas, la interior y la exterior. Un COP de 3 implica un rendimiento del 300% que vendría siendo lo mismo a 1 kWh consumido de energía eléctrica aporta 3 kWh de energía transformada en calor dentro del depósito de acumulación.

2.6 Tipos de intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor pueden ser abiertos o cerrados, los cuales se ocupan dependiendo de la disponibilidad del espacio, demanda térmica y disponibilidad de agua subterránea, entre otros factores.

2.6.1 Sistemas abiertos

Los sistemas abiertos (GWHE¹⁶) se basan en el aprovechamiento de aguas subterráneas como intercambiador de calor. El agua entonces se equilibra térmicamente con los sedimentos y, por lo tanto, es un excelente medio para extraer o disipar calor en los sedimentos. El líquido que transporta el calor es el agua misma del acuífero.

¹⁶ GWHE → Ground Water Heat Exchanger.

Se requieren dos pozos: mediante un pozo (extracción) de alimentación se bombean estas aguas hacia la bomba de calor, una vez utilizadas para ceder el calor transportado en el evaporador, se devuelve al acuífero a través de un otro pozo de reinyección, que deben estar aguas abajo en el acuífero. Por eso, es necesario conocer las cotas hidráulicas y el correspondiente flujo subterráneo de las aguas. Para esta aplicación se requieren derechos no consuntivos en la DGA, ya que el agua se reinyecta, sin embargo, debe seguir el mismo trámite administrativo de solicitud de explotación de aguas contemplado por la DGA (DGA (2008) en Seisdedos, 2012).

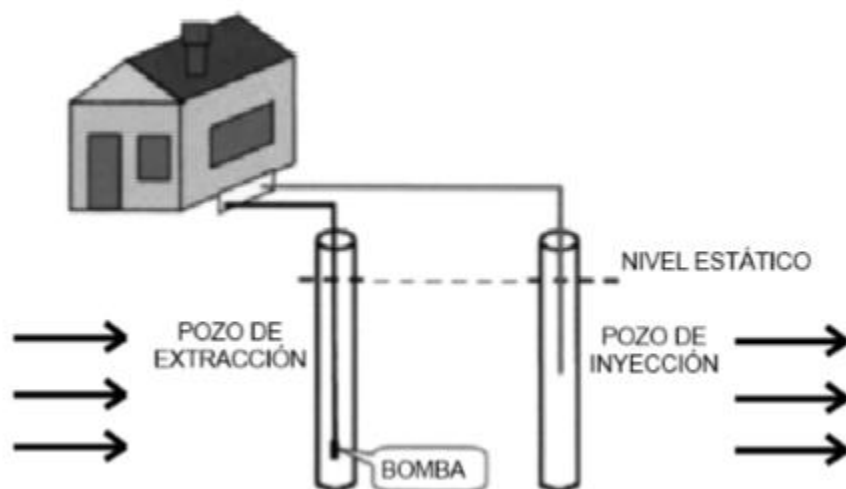


Figura 2.6: Intercambiador de calor GWHE. Las flechas indican la dirección del flujo de las aguas subterráneas. Fuente: modificado de Florides & Kalogirou, 2007.

2.6.2 Sistemas cerrados

En este caso el reservorio es el relleno sedimentario, que puede estar o no saturado de agua. El líquido que intercambia calor usualmente es una mezcla de agua con anticongelante.

Los sistemas cerrados se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Según el tipo de instalación
 - Horizontal que, según el número de tubo puede ser simple, doble, slinky, etc.
 - Vertical que, según el tipo de tubería puede ser simple O, doble U y coaxial.

- Según la trayectoria de fluido pueden ser:
 - Serie
 - Paralelo

Una mayor descripción de los diferentes tipos de instalación para sistemas cerrados se describe en la siguiente subsección.

2.6.2.1 Sistemas horizontales

Los intercambiadores de calor geotérmicos horizontales consisten en sondas de polietileno de alta densidad o polietileno reticulado (PE-X) que forman circuitos a una profundidad de entre 1,2 m y 1,5 m separados entre 30 cm y 80 cm. Para instalar este sistema, se requiere un área de trabajo que sea 1,5 veces la superficie habitable que se quiere climatizar.

Este sistema tiene varias desventajas, entre ellas: Se necesita mayor longitud de sonda y una mayor superficie para su instalación. Debido a que no se realizan sondeos profundos, la temperatura del terreno a esta profundidad varía con las condiciones climáticas. La superficie del terreno debe estar despejada sin árboles ni raíces que interfieran en el intercambio de calor, no debe ser asfaltada, y debe ser liberada de nieve. Es posible cultivar vegetales sobre la instalación, pero no árboles de raíces profundas (Jara Morales & Martinez Martinez, 2016).

El intercambiador horizontal tiene la ventaja de poseer mayor rentabilidad y un bajo costo de instalación en comparación al intercambiador vertical, lo que hace más común para climatizar viviendas.

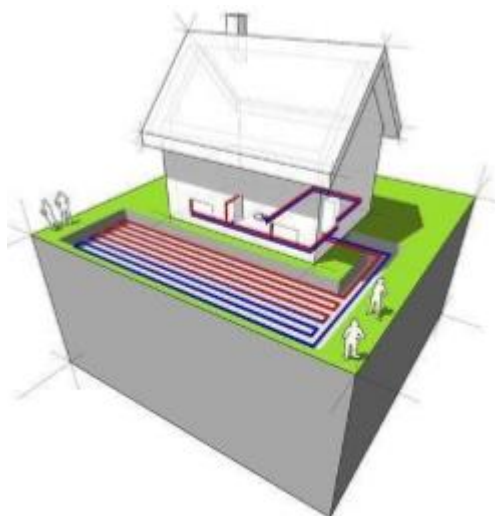


Figura 2.7: Diagrama de un sistema geotérmico horizontal. Fuente: informe de vigilancia tecnológica, 2017.

La instalación de un sistema de intercambiador horizontal consiste en calcular el área del colector horizontal, a través de la potencia entregada por el suelo de una determinada tipología y la energía máxima extraíble del suelo (SEE).

2.6.2.2 Sistemas verticales

Los intercambiadores de calor geotérmicos verticales (BHE¹⁷) están formados por sondas de polietileno de alta densidad en formato de U simple o en U doble, alojados en el interior de sondeos (perforaciones) verticales, de profundidad variable entre 10 m y 250 m, siendo las más frecuentes entre 50 y 100 m. Generalmente las perforaciones son rellenadas por un mortero especial que mejora la conductividad.

La profundidad exacta de los pozos depende de la superficie a climatizar y la cantidad de perforaciones que se realicen. Para determinarla se considera una relación de 100-130 metros de profundidad con respecto a la superficie de una vivienda, con distanciamiento entre tuberías de 50 mm a 60 mm medido desde el centro de los tubos.

En la figura 2.8, se observa la configuración de un sistema BHE.

¹⁷ BHE→ Borehole Heat Exchanger.

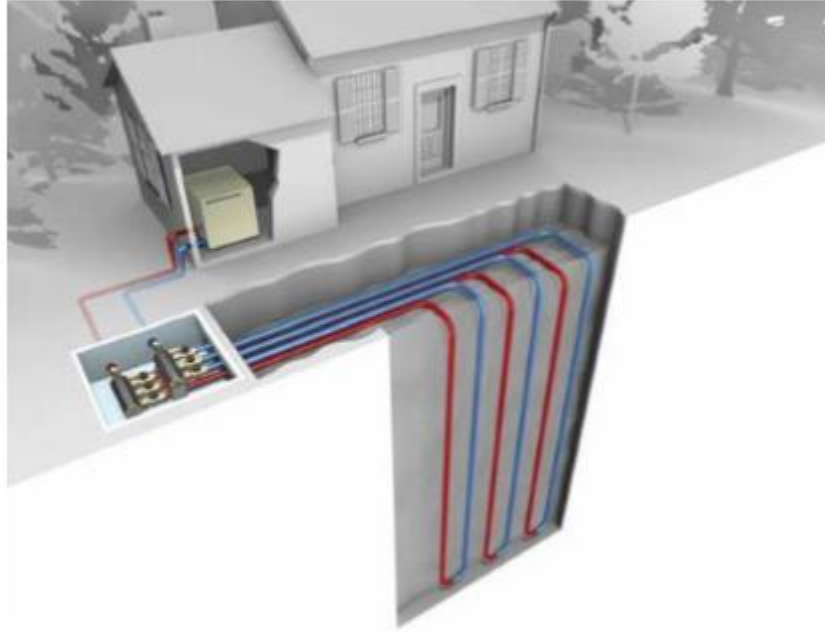


Figura 2.8: Intercambiador vertical en U. Fuente: Rivas, 2016.

La configuración en U consiste en un par de cañerías rectas unidas por una curva. El objetivo es tener un tubo de ida y uno de vuelta para el fluido, que ingresa por una de las tuberías y salga por la otra con el calor ya captado.

Con el objetivo de aumentar la transferencia térmica desde el pozo al circuito y reducir la cantidad de perforaciones, se utiliza en algunos casos, la configuración de doble U (ver figura 2.9), la cual tiene dos tuberías para bajar el fluido y dos para subirlo. Esta sonda en doble U, llamada sonda RAUGEO PE-Xa está compuesta por dos sondas de U individuales cruzadas y unidas entre ellas. La particularidad de esta sonda radica en que prescinde de una soldadura, porque constituye un tubo sin uniones en el terreno, sin soldaduras. El pie curvado de la sonda está protegido adicionalmente con una resina de poliéster especial reforzado con fibra de vidrio (REHAU, 2018).

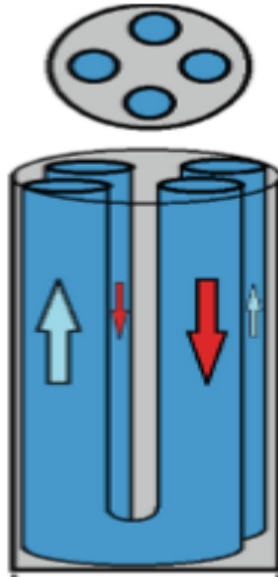


Figura 2.9: Representación gráfica del intercambiador vertical doble U. Extraído de la tesis de Ochoa, 2019.

Esta instalación no es afectada por los factores climáticos externos y necesita una menor longitud de tubo, debido a que estos tienen una mayor transferencia de calor por metro lineal de captador. Los intercambiadores verticales captan una temperatura estable aproximada de 15°C y entregan aproximadamente entre 32 W y 43 W de energía por metro perforado (Natural Resources Canada 's Office of Energy Efficiency, 2004).

El intercambiador de calor con el subsuelo es muy importante en estas instalaciones, ya que condiciona el funcionamiento de la instalación en su totalidad. De ahí la importancia de estudiar los parámetros que rigen el intercambio térmico en el subsuelo (Fernandez Bellver, 2013). La longitud de los pozos intercambiadores de calor es crucial para un diseño óptimo y de bajo costo y se condiciona directamente al comportamiento del intercambiador de calor que se da entre el pozo y el subsuelo.

Para el diseño de este tipo de sistema, es necesario conocer valores como la capacidad de transferencia térmica del pozo, tamaño y configuraciones, como también el tipo de material de relleno que se utilizará. Debido a esto, es necesario conocer con exactitud los valores de la conductividad térmica y la resistencia del suelo para un diseño más preciso del sistema.

Este sistema es ideal para aquellos casos donde la superficie disponible no sea lo suficientemente extensa para la implementación de un sistema horizontal, o si la demanda energética es alta. En la siguiente figura, se observa algunos tipos de intercambiadores cerrados.

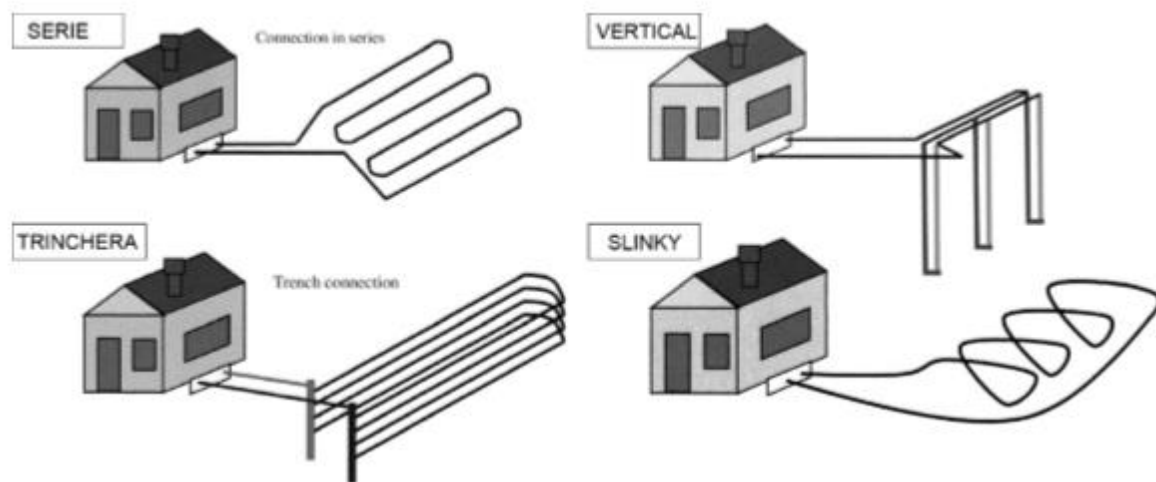


Figura 2.10: Diferentes configuraciones de Intercambiadores de calor cerrado. Fuente: Florides & Kalogirou, 2007.

2.6.3 Elección del fluido circulante

El fluido que circula por el intercambiador de calor enterrado es agua o agua con anticongelante (generalmente glicol) y su elección está condicionada por las temperaturas límite de diseño. Se utilizará anticongelante si se prevé en diseño que el intercambiador geotérmico puede tener riesgo de congelación (elevado funcionamiento en calefacción, temperaturas frías de terreno, etc). Habitualmente se recurre al anticongelante cuando se estima que la temperatura mínima de salida del evaporador va a ser menor a 5°C.

2.7 Modelos matemáticos

Kelvin desarrolló la teoría de la línea infinita en el año 1861 para el cálculo del transporte térmico en intercambiadores enterrados, fueron las primeras aproximaciones a este modelo. El primer algoritmo sobre este tema fue desarrollado por Ingersoll & Plass en 1948. Muchos investigadores formularon modelos analíticos y numéricos para tratar el problema de la transmisión de calor en el suelo, Kavanaugh y Eskilson son los más reconocidos, aunque la IGSHPA (International Ground Source Heat Pump Association) utiliza para su modelo el algoritmo de Kusuda & Achenbach de 1965.

2.7.1 Modelo de fuente lineal

Si se asume que el suelo es un medio homogéneo e isotrópico, y que la diferencia de temperatura entre las secciones de entrada y de salida de la tubería en un sistema BHE es constante en el tiempo, entonces es posible encontrar una solución analítica para estimar la variación de la temperatura en función del tiempo durante el régimen transitorio. Así, para la interpretación de TRTs comúnmente se supone que los intercambiadores de calor geotérmicos se comportan como una fuente de calor lineal, que libera instantáneamente una cantidad finita de energía uniforme y constante en la dirección radial, lo que se puede modelar como flujo de calor en un dominio 2D infinito y homogéneo con temperatura inicial uniforme. Este modelo conceptual y matemático conocido como el modelo de fuente de calor lineal (en inglés Line Heat Source LHS), se basa en la teoría de la fuente lineal de Kelvin y ha sido durante mucho tiempo el método elegido para interpretar el comportamiento de los sistemas BHE (Ingersoll & Plass, 1948; Morgensen, 1983).

De esta forma, suponiendo que el modelo LHS es válido, la temperatura alrededor del sistema BHE como función del tiempo y la distancia radial, se puede calcular como:

$$T(r, t) - T_0 = \frac{q}{4\pi k} E_1 \left[\frac{r^2}{4\alpha t} \right] \quad \text{Ecuación 8}$$

donde T [K] es la temperatura del suelo, T_0 [K] la temperatura inicial del suelo, t [s] el tiempo, r [m] la distancia radial desde el eje de la perforación, q $\left[\frac{W}{m} \right]$ la tasa de inyección de calor por metro de longitud del sondaje, la conductividad térmica (denotado por k) de unidad $\left[\frac{W}{mK} \right]$, α $\left[\frac{m^2}{s} \right]$ la difusividad térmica del suelo, E_1 denota la función integral exponencial. Sin embargo, para valores pequeños del argumento de dicha función, es decir, tiempos largos o distancias cortas desde la fuente, la solución puede ser aproximada por (Carslaw & Jaeger, 1959):

$$T(r, t) - T_0 = \frac{q}{4\pi k} \left[\ln \left(\frac{4\alpha t}{r^2} - \gamma \right) \right] \quad \text{Ecuación 9}$$

donde γ es la constante de Euler. El máximo error de esta simplificación es menos de 20% para tiempos mayores a $\frac{1,2 r^2}{\alpha}$ y menos de 10% para los tiempos menores a $\frac{1,8 r^2}{\alpha}$. Comúnmente, para la interpretación de TRTs, se utiliza datos de tiempos mayores a $\frac{5 r^2}{\alpha}$ (Signorelli et al, 2007; Luo et al, 2013; Wang et al, 2013).

Se define la resistencia térmica por unidad de longitud entre el fluido y la pared del pozo, como:

$$R_b = \frac{\bar{T}_f(t) - T(r_b, t)}{q} \quad \text{Ecuación 10}$$

donde r_b [m] es la posición de la pared del sondaje y $\bar{T}_f(t)$ [K] es la temperatura media del fluido que circula en el sistema, definida como:

$$\bar{T}_f(t) = \frac{T_{\text{entrada}} + T_{\text{salida}}}{2} \quad \text{Ecuación 11}$$

donde T_{entrada} [K] y T_{salida} [K] son las temperaturas de entrada y salida del fluido, respectivamente.

Evalutando la ecuación 9 en r_b y combinando con la ecuación 10, $T_f(t)$ se convierte en una relación lineal simple:

$$T_f(t) = k * \ln(t) + m \quad \text{Ecuación 12}$$

En donde,

$$k = \frac{q}{4\pi k} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$m = \frac{q}{4\pi k} \left[\ln\left(\frac{4\alpha}{r^2}\right) - \gamma \right] + T_0 + qR_b \quad \text{Ecuación 14}$$

2.8 Costos de instalación

El costo de instalación de un sistema de climatización mediante bombas de calor geotérmicas es la principal barrera de entrada a la tecnología. El costo total va a depender de la capacidad total del sistema, del tipo de intercambiador geotérmico y del lugar físico de la instalación, entre otros. Se puede asumir que, para los distintos sistemas estudiados en este trabajo, el costo de la bomba de calor y de la distribución del calor dentro de la vivienda es el mismo. El costo del intercambiador de calor desde la fuente hacia la bomba es el que varía entre cada sistema.

En el caso de los sistemas horizontales, se debe considerar un colector geotérmico horizontal, generalmente son tuberías de polipropileno que van enterradas a 1.5 m, por lo que hay un costo de la instalación asociado a la excavación de la zanja y las conexiones, además de las tuberías, codos metálicos, etc. En el caso de un sistema GWHE, se debe realizar un pozo profundo. Las empresas de perforación locales perforan un mínimo de 30 m y el costo promedio por metro perforado y habilitado es de \$166.600¹⁸ IVA incluido, a esto se le debe añadir el costo de la bomba de agua.

Para el caso de sistemas BHE, se debe realizar una perforación profunda y luego insertar el colector geotérmico o sonda vertical. El mercado actual en Chile aún es muy pequeño lo que ha dificultado evaluar el precio para la sonda vertical. Para este ítem, se utiliza una cotización online que sugiere un costo de \$CLP1.500.000¹⁹ para la sonda vertical. Luego, los precios para cada sistema se presentan en la Tabla 3. Se debe notar que el costo de la perforación está en \$CLP por metro y no representa el costo total de la perforación.

¹⁸ \$CLP 166.600 → 205 USD (cambio actual).

¹⁹ \$CLP 1.500.000 → 1.844 USD (cambio actual)

Tabla 3. Precios de los principales ítems para la instalación de sistemas de bombas de calor geotérmicas. Extraído de la tesis de David Traverso, 2017.

Ítem	Estimación de costos (\$CLP)		
	Sistema horizontal cerrado	GWHE	BHE
Bomba de calor (4 kW nominal)	6.000.000	6.000.000	6.000.000 ²⁰
Colector geotérmico	3.000.000 ²¹		1.500.000
Perforación profunda (\$CLP/m)		166.600	166.600

²⁰ \$CLP 6.000.000 → 7.376 USD (cambio actual).

²¹ \$CLP 3.000.000 → 3.688 USD (cambio actual).

2.9 Aspectos Legales

En Chile, actualmente, existe una ley desde el año 2000 (ley 19.657) que regula las concesiones geotérmicas y que pretende facilitar el procedimiento de solicitud y obtención de derechos sobre recursos geotérmicos. Esta ley, sin embargo, no considera una diferencia entre recursos de alta o de baja temperatura, ni si contemplan la generación de energía eléctrica o usos directos, además de ser poco precisa con respecto a las formas de extracción de calor.

- Sistemas cerrados

En el caso de los sistemas cerrados (vertical y horizontal), el marco regulatorio no incluye la explotación de energía geotérmica de baja entalpía, ya que no hace referencia a esa. Según la ley 19.657 (sobre concesiones de energía geotérmica) son para generación de energía eléctrica a partir del recurso geotérmico y no su uso directo. En Chile, los proyectos de baja entalpía que usan estos sistemas no han solicitado permisos de exploración ni de explotación geotérmica.

- Sistemas abiertos

En el caso de sistemas abiertos (GWHE), al utilizar un recurso hídrico, se debe solicitar un derecho de aprovechamiento no consuntivo de aguas subterráneas a la Dirección General de Aguas (DGA) y este procedimiento está sujeto al Código de Aguas (1981) que regula y normaliza los procesos a seguir para esta solicitud. Cualquier persona natural o jurídica puede solicitar un derecho de aprovechamiento de aguas subterráneas de acuerdo con los procedimientos y requisitos establecidos en el Código de Aguas (1981).

3. METODOLOGÍA

La metodología de diseño que se utiliza en esta tesis es la International Ground Surface Pump Association (IGSHPA). La metodología aplicada está basada en la teoría de la fuente de calor de línea infinita (Kelvin Line Source Theory) desarrollada por Ingersoll y Plass (1948). Establece que un intercambiador de calor que cede calor al suelo se comporta como una fuente de calor con un espesor pequeño y longitud infinita, y por tanto sólo cede calor en sentido radial. Se trata de un método de cálculo que asume que el sistema funciona durante un tiempo determinado a una carga constante y con el suelo a la temperatura más desfavorable, es decir, el mes enero para refrigeración y el mes de julio para calefacción. Durante el resto del año la temperatura es más moderada y por tanto la carga calorífica o frigorífica es menor, haciendo que el sistema funcione con un rendimiento mayor. Además, el suelo no estará tan frío en invierno ni tan caliente en verano, lo que hará que la temperatura del aire sea más moderada y el sistema funcionará con un mayor rendimiento. Se basa en varias metodologías que combinadas nos permiten evaluar la idoneidad de la instalación de una bomba de calor geotérmica.

Para concretar la metodología, se aplicará el mismo diseño de una instalación geotérmica para los dos puntos del área de estudio, una vivienda unifamiliar en Talca y una escuela rural en Manzanar.

El método desarrollado en este trabajo incluye 2 etapas:

- 1) Calcular la tasa de extracción de calor promedio a través de:
 - a. Estratigrafía del terreno → A través de un pozo muestreado, estimar la tasa de extracción de calor de cada estrato rocoso considerando los valores de la norma alemana 4640-2 y, posteriormente, calcular el promedio ponderado de las tasas de calor de cada espesor.
 - b. Modelo cilíndrico → Por medio de mediciones a terreno usando TRT se puede obtener la conductividad térmica de un modo más eficiente. Posteriormente, considerando la conductividad térmica se puede calcular la tasa de extracción promedio usando la fórmula de la conducción de calor de Fourier adaptándola a nuestro caso de estudios que son los sistemas BHE.
- 2) Calcular la profundidad a perforar a través de:
 - a. Considerando la tasa de extracción de calor → Conociendo la tasa de extracción de calor promedio y la potencia del suelo se puede calcular la profundidad a perforar.

- b. Longitud del intercambiador de calor enterrado → A través de la longitud del intercambiador enterrado se puede determinar con precisión la profundidad a perforar. Para eso, se debe conocer las características de la bomba de calor a utilizar, la temperatura media del fluido y del terreno, la resistencia de la tubería y del terreno, así como también el factor de utilización.

3.1 Cálculo del parámetro specific Heat Extraction (sHE)

3.1.1 A través de la estratigrafía del terreno

Con el fin de estimar el potencial geotérmico para intercambiadores verticales, es necesario conocer la naturaleza de los materiales del área de estudio con mayor precisión. De esta manera se puede conocer la tasa de extracción de calor (specific Heat Extraction o simplemente sHE por sus siglas en inglés) para cada material del área de estudio. La tasa de extracción de calor (sHE) es una medida del potencial calórico por metro de perforación de pozo y su unidad es [W/m].

En la siguiente tabla (tabla 4), se presentan los valores de la tasa de extracción de calor (sHE) para diferentes materiales según la norma alemana VDI 4640-2 (2001).

Tabla 4: Valores típicos de la tasa de extracción para cada sedimento. Fuente: ATECYR, 2013.

Suelo	Tasa de extracción de Calor (sHE)	
	2400 h de operación [W/m]	sHE a usar
Grava, arena. Seco	< 20	20
Grava, arena. Saturado	55 - 85	70
Suelos Con alto flujo de agua subterránea	80 - 100	90
Arcilla, limo. Húmedo	30 - 40	40

Piedra caliza	45 - 60	60
Piedra arenisca	55 - 65	65
Granito	55 - 70	70
Basalto	35 - 55	50
Gneis	60 - 70	70

Se clasifican como grava y arena saturada si están bajo el nivel estático y, gravas y arenas secas si están sobre el nivel estático. Para efecto de este estudio se utilizará los valores de sHE a 2400 [h] de operación.

Como el sHE es variable para cada capa y depende en gran medida del contenido en agua y su velocidad para cada pozo donde se encuentra la información estratigráfica, se calculará el sHE promedio de todas las capas estratigráficas del pozo. Para determinar con mayor exactitud los valores de sHE se utilizará la estratigrafía²² correspondiente a un pozo en la ciudad de Talca, y una correspondiente a Manzanar²³. Este perfil estratigráfico se utilizará para determinar la profundidad a perforar del sistema BHE. En el anexo 8.2 se encuentra el perfil estratigráfico detallado.

Con los valores de sHE estimados, se procede a calcular la tasa de extracción de calor promedio (sHE_{prom}). Para cada pozo se calculará un valor promedio ponderado de sHE, el cual puede ser calculado a través de la siguiente expresión:

$$sHE_{prom} = \frac{1}{H_{total}} * \sum_{k=1}^n (sHE_i * h_i) \quad \text{Ecuación 15}$$

donde,

- sHE_{prom} = Tasa de extracción de calor promedio de cada pozo $\left[\frac{W}{m}\right]$.
- H_{total} = Profundidad total del pozo [m].

²² Perfil estratigráfico extraído de la tesis de Jaime Rubio.

²³ Perfil estratigráfico extraído del Sernageomin 1991.

- sHE_i = El sHE de la i-ésima capa estratigráfica $\left[\frac{W}{m}\right]$.
- h_i = Espesor de la i-ésima capa [m].

3.1.2 A través de un modelo cilíndrico

La tasa de extracción de calor también puede ser calculada a través de un modelo teórico aplicado a un sistema cilíndrico el cual tiene como base la ley de conducción de calor de Fourier (ver en marco teórico sección 2.2). Mediante la ecuación 5 (ver sección 2.2) se puede obtener la tasa de extracción de calor, el cual está descrito de la siguiente forma:

$$sHE_{moCilindro} = \frac{2\pi(T_1 - T_4)}{\left(\frac{1}{k_a}\right)\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \left(\frac{1}{k_b}\right)\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \left(\frac{1}{k_c}\right)\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)} \quad \text{Ecuación 16}$$

donde,

- $sHE_{moCilindro}$ = Tasa de extracción de calor por metro lineal promedio calculada mediante modelo cilíndrico $\left[\frac{W}{m}\right]$.
- k_a = Conductividad térmica de la tubería $\left[\frac{W}{mK}\right]$.
- k_b = Conductividad térmica del relleno del pozo $\left[\frac{W}{mK}\right]$.
- k_c = Conductividad térmica del terreno $\left[\frac{W}{mK}\right]$.
- T_1 = Temperatura del agua en el interior del cilindro [$^{\circ}C$ o K].
- T_4 = Temperatura del medio sin perturbar [$^{\circ}C$ o K].
- r_1 = Distancia desde el centro del sistema al borde interior de la primera capa [m].
- r_2 = Distancia entre el centro del sistema hasta el borde externo de la primera capa [m].
- r_3 = Distancia entre el centro del sistema y el borde externo de la segunda capa [m].
- r_4 = Distancia que existe entre el centro del cilindro y el punto que se encuentra sin ser afectado por los cambios que ocurran en éste [m].

Es importante destacar que la tasa de extracción de calor será calculada considerando las medidas de un pozo localizado en el edificio Parque Tecnológico de la Universidad de Talca, estudio hecho por Fernanda Ochoa (2019).

3.2 Cálculo de la profundidad a perforar

3.2.1 Considerando la tasa de extracción de calor promedio

Para calcular la profundidad a perforar es necesario conocer la carga térmica de la vivienda y la potencia del suelo. En las siguientes subsecciones se indicará la forma de calcular.

3.2.1.1 Cálculo de la carga térmica de la vivienda

La carga térmica para calefacción puede ser calculado de la siguiente forma:

$$Q_{\text{Térmica}} = Q_T + Q_R + Q_{\text{In}} - Q_P - Q_E \quad \text{Ecuación 17}$$

donde,

Q_T = Qtransmisión; Q_R = Qrenovación; Q_{In} = Qinfiltración; Q_P = Qpersonas y Q_E = Qequipos, siendo:

$$Q_{\text{transmisión}} = \sum U_i * A_i * (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) \quad \text{Ecuación 18}$$

donde,

- U_i = Transmitancia térmica del cerramiento "i" [$\frac{W}{m^2K}$].
- A_i = Superficie del cerramiento "i" en contacto con el exterior [m^2].
- T_{int} = Temperatura interior de la vivienda en invierno (22°C).
- T_{ext} = Temperatura del ambiente exterior en invierno (0,8°C).

$$Q_{\text{renovación}} = m * C_{\text{paire}} * (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) \quad \text{Ecuación 19}$$

donde,

- m = Caudal volumétrico del aire de renovación [$\frac{kg}{s}$]; se calcula como el volumen del aire del edificio renovado cada hora, siendo la densidad del aire de 1,18 [$\frac{kg}{m^3}$] (superficie x altura x densidad / 3600 segundos).

- $C_{\text{paire}} = \text{Calor específico del aire } (C_{\text{paire}} = 1000 \left[\frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right])$.

$$Q_{\text{infiltración}} = m * C_{\text{paire}} * (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) \quad \text{Ecuación 20}$$

donde,

- $m = \text{Caudal volumétrico del aire de infiltración } \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$, que se estima en un 25% del caudal volumétrico del aire de renovación.
- $C_{\text{paire}} = \text{Calor específico del aire } (C_{\text{paire}} = 1000 \left[\frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right])$.

$$Q_{\text{personas}} = n^{\circ} \text{ personas} * q_{1\text{persona}} \quad \text{Ecuación 21}$$

donde,

- $q_{1\text{persona}} = \text{Calor que desprende una persona } [\sim 100 \text{ W/persona}]$.
- $n^{\circ} \text{ personas} = \text{Número de personas que habitan en la vivienda}$.

$$Q_{\text{equipos}} = \sum n^{\circ} \text{ equipoi} * Pot_i + \sum Silum * Potilum \quad \text{Ecuación 22}$$

donde,

- $n^{\circ} \text{ equipoi} = \text{Número de equipos iguales}$.
- $Pot_i = \text{Potencia del equipo } [\text{W}]$.
- $Silum = \text{Superficie iluminada } [\text{m}^2]$.
- $Potilum = \text{Potencia de iluminación de un espacio } \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$.

Se considera que los equipos y electrodomésticos no funcionarán todos a la vez, por lo que se aplicará un coeficiente de simultaneidad del 0,75.

Saber con exactitud la carga térmica de la vivienda es crucial porque es el parámetro usado para seleccionar la bomba de calor adecuada para la vivienda.

3.2.1.2 Cálculo de la Potencia de suelo

De las ecuaciones 5 y 6 (ver sección 2.3.1 (Marco teórico)) podemos reescribir la ecuación para calcular la potencia del terreno mediante la siguiente expresión:

$$Q_{\text{suelo}} = Q_{\text{total}} - \frac{Q_{\text{total}}}{\text{COP}} \quad \text{Ecuación 23}$$

donde,

- Q_{suelo} = Potencia térmica del terreno [W].
- Q_{total} = Potencia térmica total [W].
- COP = Rendimiento de la bomba de calor.

3.2.1.3 Cálculo de la profundidad a perforar

La profundidad para perforar puede ser calculada a través de la siguiente ecuación:

$$P_{\text{perforar}} = \frac{Q_{\text{suelo}}}{sHE_{\text{prom}}} \quad \text{Ecuación 24}$$

donde,

- P_{perforar} = Profundidad a perforar [m].
- Q_{suelo} = Potencia del terreno [W].
- sHE_{prom} = Tasa de extracción de calor promedio [W/m].

3.2.2 A través del cálculo de la longitud del intercambiador de calor enterrado

A través del cálculo de la longitud del intercambiador de calor enterrado se puede determinar con precisión la real profundidad a perforar para satisfacer la demanda energética de las instalaciones. Para tal, es necesario conocer el valor de las variables que se describen en las siguientes subsecciones.

3.2.2.1 Temperatura mínima del terreno

A través de la ecuación (4, ver en sección 2.1.2) se puede determinar la temperatura mínima del terreno (T_L) que ocurre durante el ciclo anual para cualquier profundidad (Z). La ecuación analítica es la siguiente:

$$T_L(Z) = T_m - A_s e^{\left(-Z \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}\right)} \quad \text{Ecuación 25}$$

Como la temperatura prácticamente no varía desde 20 metros hasta los 100 metros, en el caso de intercambiadores verticales se considera $A_s = 0$. Se suele escoger la temperatura media anual del aire ambiente (T_m) sobre la superficie del terreno (Kavanaugh and Rafferty, 1997).

3.2.2.2 Temperatura de entrada y de salida del fluido en la bomba de calor

De la definición de calor específico (ver en sección 2.1.1.2 (marco teórico)), se tiene que:

$$\Delta Q = c_p m \Delta T \quad \text{Ecuación 26}$$

$$\frac{\Delta Q}{cm} = T_{\text{entrada}} - T_{\text{salida}} \quad \text{Ecuación 27}$$

De las ecuaciones 5 y 6 (ver sección 2.3.1), se tiene que:

$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{TOTAL}}}{W_{\text{TOTAL}}} \quad \text{y} \quad Q_{\text{TOTAL}} = Q_{\text{SUELO}} + W_{\text{TOTAL}}$$

Podemos reescribir la ecuación 5 como:

$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{SUELO}} + W_{\text{TOTAL}}}{W_{\text{TOTAL}}} \quad \text{Ecuación 28}$$

Aislando el W_{TOTAL} , se tiene:

$$W_{TOTAL} = \frac{Q_{SUELO}}{COP-1} \quad \text{Ecuación 29}$$

Por otro lado, desde la ecuación 5 podemos aislar el Q_{TOTAL} ,

$$Q_{TOTAL} = W_{TOTAL} * COP \quad \text{Ecuación 30}$$

Sustituyendo el W_{TOTAL} (de la ecuación 29) en la ecuación 30 y aislando el Q_{SUELO} se tiene:

$$Q_{SUELO} = \frac{COP-1}{COP} * Q_{TOTAL} \quad \text{Ecuación 31}$$

Luego, reemplazando la ecuación 31 en la ecuación 27 y se obtiene la expresión para calcular la diferencia de temperatura entre la temperatura de entrada y de la salida del fluido en el intercambiador:

$$T_{entrada} - T_{salida} = \frac{\frac{COP-1}{COP} * Q_{TOTAL}}{cm} \quad \text{Ecuación 32}$$

Donde el Q_{TOTAL} es la potencia de la bomba, la cual será designada como P_{bomba} ; m es la masa, la cual la vamos a reescribir como $\rho_{agua} * \text{caudal}$. Luego la ecuación para calcular la temperatura de entrada y de salida del fluido en la bomba de calor será:

$$T_{salida} = T_{entrada} - \frac{P_{bomba} * \frac{COP-1}{COP}}{C_p * \rho_{agua} * \text{caudal}} \quad \text{Ecuación 33}$$

donde,

- $T_{entrada}$ = Temperatura de entrada del fluido al evaporador [°C] después de absorber el calor de la tierra.

- T_{salida} = Temperatura de salida del fluido en el evaporador [$^{\circ}\text{C}$]
- P_{bomba} = Potencia de la bomba de calor [kW].
- C_p = Calor específico del agua $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right]$.
- ρ_{agua} = Densidad del agua $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$.
- COP = Rendimiento de la bomba de calor.
- caudal = Caudal de la bomba $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]$.

Con los valores de la temperatura de entrada y salida determinados, se calcula la temperatura mínima de entrada del fluido (o simplemente temperatura media del fluido ($\bar{T}_f(t)$), ver ecuación 11 en sección 2.5.1 del marco teórico) en la bomba de calor mediante a la siguiente ecuación:

$$T_{\min} = \frac{1}{2} (T_{\text{entrada}} + T_{\text{salida}}) \quad \text{Ecuación 34}$$

3.2.2.3 Cálculo de la longitud del intercambiador de calor enterrado

De las ecuaciones 9 y 10 (ver sección 2.5.1 (marco teórico)) se tiene que:

$$T(r, t) - T_0 = \frac{q}{4\pi k} \left[\ln \left(\frac{4\alpha t}{r^2} - \gamma \right) \right] \quad \text{y} \quad R_b = \frac{\bar{T}_f(t) - T(r_b, t)}{q}$$

Rescribiendo la ecuación 10 como:

$$q * R_b = \bar{T}_f(t) - T(r, t) \quad \text{Ecuación 35}$$

Y sustituyendo la ecuación 9 en 35 se obtendrá:

$$q * R_b = \bar{T}_f(t) - \frac{q}{4\pi k} \left[\ln \left(\frac{4\alpha t}{r^2} - \gamma \right) \right] - T_0 \quad \text{Ecuación 36}$$

Factorizando q, se tiene:

$$\bar{T}_f(t) - T_0 = q \left[R_b + \frac{1}{4\pi k} \left(\ln \left(\frac{4\alpha t}{r^2} - \gamma \right) \right) \right] \quad \text{Ecuación 37}$$

Se tiene que $q = \frac{Q}{L}$ y reemplazándolo en la ecuación 37, se tiene:

$$\bar{T}_f(t) - T_0 = \frac{Q}{L} \left[R_b + \frac{1}{4\pi k} \left(\ln \left(\frac{4\alpha t}{r^2} - \gamma \right) \right) \right] \quad \text{Ecuación 38}$$

$$L = \frac{Q}{\bar{T}_f(t) - T_0} [R_b + R_s * F] \quad \text{Ecuación 39}$$

donde,

- $\bar{T}_f(t) - T_0 = T_{\min} - T_L$
- $Q = P_{\text{bomba}} * \frac{\text{COP} - 1}{\text{COP}}$
- $R_s = \frac{1}{4\pi k} \left(\ln \left(\frac{4\alpha t}{r^2} - \gamma \right) \right)$

Luego, la longitud del intercambiador enterrado en modo calefacción será:

$$L_{\text{calefacción}} = \frac{P_{\text{bomba}} * \frac{\text{COP} - 1}{\text{COP}} (R_p + R_s * F)}{T_L - T_{\min}} \quad \text{Ecuación 40}$$

donde,

- P_{bomba} = Potencia de la bomba de calor en modo calefacción (generalmente otorgada por el fabricante).
- R_p = Resistencia térmica de las tuberías (dependerá de los materiales utilizados).
- R_s = Resistencia térmica de los intercambiadores.
- F = Factor de utilización.

La Resistencia térmica de los intercambiadores es el inverso de la conductividad térmica del suelo.

El factor de utilización (F) representa la fracción de tiempo que está en marcha la bomba de calor y, por tanto, el tiempo de funcionamiento estacional de la instalación.

La resistencia térmica de las tuberías se determina de la siguiente manera:

$$R_p = \frac{1}{2\pi \cdot k_p} \ln \left(\frac{D_o}{D_i} \right)$$

Ecuación 41

donde,

- D_o = Diámetro exterior del tubo [m].
- D_i = Diámetro interior del tubo [m].
- k_p = Conductividad térmica del tubo $\left[\frac{W}{mK} \right]$.
- $\ln$ = Logaritmo neperiano.

4. RESULTADOS

En esta sección se calculan y analizan todas las variables necesarias para implementar un sistema vertical cerrado.

4.1 Talca

Se desea instalar un sistema de calefacción por bomba de calor geotérmica, para proporcionar calefacción y agua caliente sanitaria a una vivienda unifamiliar de 115 metros cuadrados para 4 personas en Talca.

4.1.1 Análisis del cálculo del sHE promedio

A partir de la tasa de extracción de calor (sHE) de cada estrato rocoso, se cuantificó el sHE promedio considerando cada espesor. Se examinó para dos escenarios específicos: considerando el suelo de Talca con alto flujo de aguas subterráneas y con flujo normal. Estos fueron calculados mediante la metodología propuesta en la sección 3. En la tabla 5 se presentan los valores obtenidos para ambos escenarios. Mayores detalles de la estratigrafía ver en anexo 8.2.

Tabla 5. Tasa de extracción de calor (sHE) promedio para el pozo con información estratigrafía.

Profundidad del pozo [m]	sHE promedio con flujo normal $\left[\frac{W}{m}\right]$	sHE promedio con alto flujo de agua subterránea $\left[\frac{W}{m}\right]$
60	65	82

Se puede observar que cuanto mayor es el contenido de agua en el pozo mayor será el calor que se puede extraer por cada metro lineal.

Para el cálculo de la tasa de extracción de calor a través del modelo cilíndrico, los datos utilizados corresponden a las medidas del pozo ubicado en la Universidad Católica de Maule en el cual se hicieron las mediciones de TRT.

$$sHE_{moCilindro} = \frac{2\pi(16)}{\left(\frac{1}{0,5}\right) \ln\left(\frac{0,016}{0,013}\right) + \left(\frac{1}{1,65}\right) \ln\left(\frac{0,035}{0,016}\right) + \left(\frac{1}{2,4}\right) \ln\left(\frac{0,5}{0,035}\right)} = 50 \left[\frac{W}{m}\right]$$

Donde: $T_4 = 16^\circ\text{C}$ es la temperatura del terreno; $r_1 = 0,013 \text{ [m]}$ es el radio interno de la tubería; $r_2 = 0,016 \text{ [m]}$ es el radio externo de la tubería; $r_3 = 0,035 \text{ [m]}$ es el radio del relleno; $r_4 = 0,5 \text{ [m]}$ es el radio hasta el punto del terreno de temperatura inalterada.

El $k_a = 0,5 \left[\frac{W}{mK}\right]$ es la conductividad térmica de la tubería; $k_b = 1,65 \left[\frac{W}{mK}\right]$ es la conductividad térmica del relleno; $k_c = 2,4 \left[\frac{W}{mK}\right]$ es la conductividad térmica del terreno. Estos datos corresponden a las medidas del pozo ubicado en la Universidad de Talca el cual se hizo mediciones de TRT.

Se puede observar que el sHE promedio con flujo normal calculado mediante los valores de la tasa de extracción de la norma alemana VDI 4640-2, se acerca más al sHE promedio calculado mediante TRT.

4.1.2 Análisis del cálculo de la profundidad a perforar considerando la tasa de extracción de calor promedio

4.1.2.1 Carga térmica de la vivienda

En el cálculo de las cargas térmicas determinamos el calor que aportará el sistema de climatización en el invierno, así como la ganancia de calor en verano que deberá evacuarse. Este será calculado solamente para los meses críticos del año, enero y julio. Durante el resto del año con condiciones menos desfavorables el sistema funcionará incluso con mayor rendimiento.

Para calcular la carga térmica, es necesario establecer algunas condiciones de diseño iniciales, tales como:

- Condiciones interiores: Se fija una temperatura y humedad relativa (HR) en base a la actividad metabólica de las personas y grado de vestimenta. Para este objeto de estudio se establece una temperatura de confort de 22°C y una HR de 50%.
- Condiciones exteriores: Se establece una temperatura exterior de diseño de 0.8°C.

En el cálculo de las cargas térmicas se consideran dos tipos de cargas, las exteriores (transmisión, renovación e infiltración) y las interiores (equipos y personas). En la siguiente tabla se muestra los resultados de estas:

Tabla 6: Resultados de las cargas térmicas.

Cargas Térmicas [W]					
	Transmisión	Renovación	Infiltración	Equipos	Personas
Valor [W]	5317,49	2237,5	559,37	3157,50	400

Luego, la carga térmica total de la vivienda será:

$$Q_{\text{térmico}} = 5317,49 + 2237,5 + 559,37 - 400 - 3157,50 = 4556,8 \text{ [W]}$$

Detalles sobre el cálculo de la carga térmica en anexo 8.3.

4.1.2.2 Selección de la bomba de calor

Basándose en la potencia de calefacción requeridas y teniendo en cuenta la carga térmica de la vivienda, se elige una bomba de calor con las siguientes características:

Tabla 7: Características de la bomba de calor seleccionada. Fuente: Catálogo CIAT AGEO, 2011.

Modelo	Potencia Calefacción [kW]	Potencia absorbida [kW]	COP	Caudal $\left[\frac{m^3}{s}\right]$
AGEO - 20H	6,8	1,5	4,5	0,0004083

La potencia de calefacción es la potencia requerida para calentar la vivienda, la potencia absorbida es la energía eléctrica que será consumida en el proceso y el COP es el rendimiento de la bomba.

4.1.2.3 Potencia térmica del terreno

La potencia térmica del terreno es:

$$Q_{\text{suelo}} = Q_{\text{total}} - \frac{Q_{\text{total}}}{\text{COP}} = 6800 - \frac{6800}{4,5} = 5289 \text{ [W]}$$

Donde, Q_{total} la potencia de la bomba de calor y COP es el rendimiento de la bomba.

Con la potencia del suelo determinada se procede a calcular la profundidad a perforar, la cual fue calculada considerando 3 escenarios:

- Suelo Saturación normal:

$$P_{\text{perforar}} = \frac{5289}{65} = 81 \text{ [m]}$$

- Suelo con alto flujo de aguas subterráneas:

$$P_{\text{perforar}} = \frac{5289}{82} = 65 \text{ [m]}$$

- Considerando la tasa de extracción de calor promedio calculado mediante el modelo cilíndrico:

$$P_{\text{perforar}} = \frac{5289}{50} = 106 \text{ [m]}$$

Tabla 8: Profundidad a perforar para diferentes escenarios.

Profundidad para perforar [m]	
Suelo Normal	81
Alto flujo de aguas subterráneas	65
Mediante TRT	106

De acuerdo con estos resultados, se puede concluir que las zonas que tienen un mayor flujo de aguas subterráneas tienen la tasa de extracción de calor más alta y consecuentemente requerirán de menor profundidad de perforación. El sHE promedio calculado mediante TRT presenta la tasa de extracción más baja y consecuentemente se requerirá de mayor profundidad a perforar para cumplir con la demanda energética requerida.

4.1.3 Análisis de la profundidad a perforar mediante el cálculo de la longitud del intercambiador enterrado

4.1.3.1 Temperatura mínima del terreno

Para los sistemas verticales cerrados $A_s = 0$ (debido a que a partir de 15 [m] aproximadamente la temperatura se vuelve constante), luego la temperatura del terreno para cualquier profundidad será igual a la media de la temperatura ambiental. En este caso se tratando de la ciudad de Talca la temperatura mínima del terreno es $T_L(Z) = 16^\circ\text{C}$.

4.1.3.2 Temperatura mínima de entrada del fluido a la bomba de calor

Para calcular la temperatura mínima de entrada del fluido a la bomba de calor es necesario tener las características de la bomba de calor a utilizar y determinar el rango de temperatura de entrada a la bomba.

- Potencia de la bomba de calor para calefacción (P_C) = 6,8 [kW].
- Caudal = $0,0004083 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$.
- Rango de temperatura de entrada (T_{entrada}) a la bomba de calor es la bomba de calor trabaja con temperaturas en el evaporador entre $[7^\circ\text{-}12^\circ]$, 12°C es la temperatura del fluido que ingresará a la bomba de calor.
- Calor específico del agua = $4,187 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right]$.
- Densidad del agua = $1000 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$.
- COP de la bomba de calor = 4,5

La temperatura del fluido que sale del evaporador será:

$$T_{\text{salida}} = 12 - \frac{6,8 * \frac{4,5 - 1}{4,5}}{4,187 * 1000 * 0,0004083} = 8,9^\circ\text{C}$$

La temperatura de salida es la temperatura del fluido que sale del evaporador y la que circula por el intercambiador enterrado.

Luego, la temperatura mínima necesaria de entrada del fluido a la bomba en este caso será:

$$T_{\text{min}} = \frac{1}{2} (8,9 + 12) = 10,5^\circ\text{C}$$

4.1.3.3 Cálculo de la resistencia térmica de las tuberías, resistencia del terreno y longitud del Intercambiador Vertical

Para calcular la longitud del intercambiador vertical es necesario conocer los valores de las siguientes variables:

- Resistencia térmica de las tuberías

La resistencia térmica de las tuberías está relacionada con la calidad y el tipo de tubería específica para cada sistema cerrado a implementar. Considerando una tubería de polietileno de alta densidad (PE-100) PN10 DN 1 (ver tabla en anexo 8.4), la resistencia térmica será:

Tabla 9: Resistencia térmica de la tubería.

Tubería HDPE PE- 100 / PN10/ DN1	
Resistencia térmica $\left[\frac{\text{mK}}{\text{W}}\right]$	0,0645

- Resistencia térmica de los intercambiadores

La resistencia térmica del intercambiador es el inverso de la conductividad térmica. La resistencia térmica del intercambiador depende del tipo de tubería, del tipo de suelo, del tipo de configuración del intercambiador de calor enterrado y del tiempo de funcionamiento de este.

$$R_s = \frac{1}{2,4} = 0,42 \left[\frac{\text{mK}}{\text{W}}\right]$$

Donde el $2,4 \left[\frac{\text{W}}{\text{mK}}\right]$, es la conductividad térmica del terreno.

- Factor de Utilización

El factor de utilización representa la fracción de tiempo que está en marcha la bomba de calor y, por lo tanto, el tiempo de funcionamiento estacional de la instalación. Determina la cantidad de calor que el sistema va a intercambiar con el suelo a lo largo del año.

Para esta tesis se utilizará $F = 0,203$ (valor extraído de la tesis de Lopez Juan, 2017), este factor fue calculado considerando 4 meses de operación de la bomba de calor en invierno.

Luego de haber calculado las variables anteriores, se tiene que la longitud del intercambiador será:

$$L_{\text{calefacción}} = \frac{6800 \times \left(\frac{4,5 - 1}{4,5} \right) (0,0645 + 0,42 \times 0,203)}{16 - 10,5} = 144 \text{ [m]}$$

La longitud total del intercambiador enterrado es de 144 [m]. Como las sondas son en formato de U (ellas son de bajada y subida, lo que sería 72 ↑ y 72 ↓).

Tabla 10: Dimensionamiento del intercambiador de calor enterrado para Talca.

Número de Perforaciones	1
Profundidad que perforar [m]	72
Longitud de la tubería [m]	144

4.2 Manzanar

Se desea instalar un sistema de climatización por bomba de calor geotérmica, para proporcionar calefacción y agua caliente a una escuela rural en Manzanar con las siguientes dimensiones: superficie total 440 [m²]; total de 60 estudiantes; 3 salas de aulas, 2 baños cocina, comedor, sala de profesores; horas anuales de uso del calefactor 2400 [h].

4.2.1 Análisis del cálculo del sHE promedio

Para este caso, el pozo estratigráfico²⁴ usado es de 2000 [m] de profundidad, pero se considerará apenas hasta los 500 [m] de profundidad que corresponden a limonitas y areniscas finas.

La tasa de extracción de calor promedio fue calculada considerando dos escenarios: suelos con flujo normal a saturado y considerando el modelo cilíndrico. Los resultados se pueden apreciar en la tabla 11.

Tabla 11: Tasa de extracción de calor (sHE) promedio para el pozo con información estratigrafía.

Profundidad del pozo [m]	sHE promedio con flujo Normal a Saturado $\left[\frac{W}{m}\right]$
500	52,5

Para el cálculo de la tasa de extracción de calor a través del modelo cilíndrico es necesario saber con exactitud la conductividad térmica del terreno. Pero, debido a que no se hizo mediciones a terreno en Manzanar se utilizará un valor de conductividad térmica aproximado de acuerdo con el tipo de material encontrado en la zona de estudio. Para este caso, teniendo en cuenta que los primeros 500 m corresponden a limonitas y areniscas, la conductividad térmica aproximada que se utilizará será de $2,2 \left[\frac{W}{mK}\right]$ (ver tabla de valores de conductividad térmica en anexo 8.1).

$$sHE_{moCilindro} = \frac{2\pi(7,5)}{\left(\frac{1}{0,5}\right) \ln\left(\frac{0,016}{0,013}\right) + \left(\frac{1}{1,65}\right) \ln\left(\frac{0,035}{0,016}\right) + \left(\frac{1}{2,2}\right) \ln\left(\frac{0,5}{0,035}\right)} = 22,4 \left[\frac{W}{m}\right]$$

Donde: $T_4 = 7,5^\circ C$ es la temperatura del terreno sin perturbar; $r_1 = 0,013$ [m] es el radio interno de la tubería; $r_2 = 0,016$ [m] es el radio externo de la tubería; $r_3 = 0,035$ [m] es el radio del relleno; $r_4 = 0,5$ [m] es el radio hasta el punto del terreno de temperatura inalterada; $k_a = 0,5 \left[\frac{W}{mK}\right]$ es la conductividad térmica de la tubería; $k_b = 1,65 \left[\frac{W}{mK}\right]$ es la

²⁴ Información sobre el perfil estratigráfico en el anexo.

conductividad térmica del relleno; $k_c = 2,2 \left[\frac{W}{mK} \right]$ es la conductividad térmica del terreno. Tal como en el caso de Talca se consideran las medidas del pozo estudiado por Fernanda Ochoa ya que es el estudio que tenemos como referencia.

4.2.2 Análisis de la profundidad a perforar considerando la tasa de extracción de calor promedio

4.2.2.1. Carga térmica de la escuela

En el caso de Manzanar²⁵ se utilizará una carga térmica de 15 [kW], una carga común para una escuela rural de 400 [m²] de 60 estudiantes.

4.2.2.2 Selección de la bomba de calor

De acuerdo con la carga térmica de la escuela la bomba de calor más adecuada es:

Tabla 12: Características de la bomba de calor seleccionada. Fuente: Catálogo CIAT AGE0, 2011.

Modelo	Potencia de Calefacción [kW]	Potencia Absorbida [kW]	COP	Caudal $\left[\frac{m^3}{s} \right]$
Ageo 50 HT	16	3,1	5,1	0,0007305

4.2.2.3 Cálculo de la potencia del suelo

La potencia del suelo de la escuela rural es la siguiente:

²⁵ Debido a la escasez de datos que se necesita para calcular la carga térmica de la escuela, se asignará una carga térmica común para una escuela con la presente dimensión y número de ocupantes.

$$Q_{\text{suelo}} = 16000 - \frac{16000}{5,1} = 12863 \text{ [W]}$$

donde, 16000 es la potencia de calefacción de la bomba y el 5,1 es el COP bomba de calor.

La profundidad para perforar para el caso de Manzanar fue calculada considerando dos escenarios:

- Suelo Saturación normal:

$$P_{\text{perforar}} = \frac{12863}{52,5} = 245 \text{ [m]}$$

- Tasa de extracción de calor promedio calculado mediante el modelo cilíndrico:

$$P_{\text{perforar}} = \frac{12863}{22,4} = 574 \text{ [m]}$$

Tabla 13: Profundidad a perforar para diferentes escenarios.

Diferentes escenarios	Profundidad Para Perforar [m]
Suelo Normal a Saturado	245
Modelo cilíndrico	574

Tanto para el caso de un suelo normal como para el caso del modelo cilíndrico, la profundidad a perforar es grande en parte debido que la tasa de extracción promedio es baja y también porque la carga térmica de la escuela requerida es considerable.

4.2.3 Análisis de la profundidad a perforar mediante el cálculo de la longitud del intercambiador enterrado

4.2.3.1 Temperatura mínima del terreno

Teniendo en cuenta que la temperatura mínima del terreno para los sistemas verticales cerrados para una determinada altura es la temperatura media ambiental, se tiene que para Manzanar es $T_L(Z) = 7,5^{\circ}\text{C}$.

4.2.3.2 Temperatura mínima de entrada del fluido a la bomba de calor

- Potencia de la bomba de calor para calefacción (P_C) = 16 [kW].
- Caudal = $0,0007305 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$.
- Rango $T_{\text{entrada},c} = [0 - 5]^{\circ}\text{C}$, rango de la temperatura elegido para entrada a la bomba de calor²⁶.
- Calor específico del agua = $4,187 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right]$.
- COP de la bomba de calor = 5,1.
- Densidad del agua = $1000 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$.

$$T_{\text{salida}} = 5 - \frac{16 * \frac{5,1 - 1}{5,1}}{4,187 * 1000 * 0,0007305} = 0,8^{\circ}\text{C}$$

Luego, la temperatura mínima necesaria de entrada del fluido a la bomba de calor será:

$$T_{\text{min}} = \frac{(0,8 + 5)}{2} = 2,9^{\circ}\text{C}$$

²⁶ Se asumirá que la bomba de calor elegida trabaja con temperatura del fluido circulante entre 0 a 5 grados Celsius.

4.2.3.3 Cálculo de la resistencia térmica de las tuberías, resistencia del terreno y longitud del intercambiador vertical

- Resistencia térmica de las tuberías

La resistencia térmica de las tuberías será la misma para el caso de Manzanar.

$$R_p = 0,0645 \left[\frac{\text{mK}}{\text{W}} \right]$$

- Resistencia térmica de los intercambiadores

Como no se hicieron mediciones in situ en Manzanar, no se sabe con exactitud la conductividad térmica del área de estudio Manzanar, por lo que se hará una asociación con el tipo de suelo de manzanar y los valores de conductividad térmica tabulados. Teniendo en cuenta que en los primeros 500 metros del suelo del área de estudio es mayoritariamente compuesto de limolitas y arenisca (de acuerdo con el perfil estratigráfico usado en este trabajo, ver detalles en anexo).

Se usará una conductividad térmica aproximada de $k_p = 2,2 \left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$. Luego, la resistencia térmica de los intercambiadores será:

$$R_s = \frac{1}{2,2} = 0,45 \left[\frac{\text{mK}}{\text{W}} \right]$$

- Factor de utilización

El factor de utilización para el caso Manzanar será el mismo que en el caso de Talca.

$$F = 0,203$$

Luego, la longitud del intercambiador encerrado será:

$$L_{\text{calefacción}} = \frac{16000 \times \left(\frac{5,1 - 1}{5,1} \right) (0,0645 + 0,45 \times 0,203)}{7,5 - 2,9} = 436 \text{ [m]}$$

Tabla 14: Dimensionamiento del intercambiador de calor enterrado para Manzanar.

Número de Perforaciones	1	2	3
Profundidad que perforar [m]	218	109	72,5
Longitud de la tubería [m]	436	218	145

Para el caso de Manzanar se puede hacer dos o tres pozos, ya que se dispone de suficiente espacio.

5. DISCUSION

5.1 Observaciones y análisis general

Las zonas donde existe un mayor flujo de agua subterránea tienden a tener una tasa de extracción de calor promedio (sHE promedio) más alta, eso se debe a que el sHE depende en gran medida de del contenido de agua y de su velocidad. Aunque sea el mismo estrato rocoso, la presencia o ausencia de agua afecta el resultado del sHE promedio obtenido. Consecuentemente la profundidad a perforar tiende a ser menor en los casos donde la tasa de extracción de calor es más alta, debido a que se requiere de menor profundidad para recolectar el calor necesario para suplir la demanda requerida.

La eficiencia de una bomba de calor depende de la temperatura objetivo y de la temperatura de la fuente. Estas juegan un rol muy importante, ya que si la temperatura de entrada a la bomba de calor es muy baja (2° C, por ejemplo) y la temperatura de confort deseada es muy alta (30° C, por ejemplo), el compresor realizará más trabajo para alcanzar la temperatura deseada y de este modo consumirá más energía eléctrica. Luego, podemos afirmar que la eficiencia de la bomba de calor decrece si aumentamos la temperatura de suministro o descendemos la temperatura de la fuente. En otras palabras, si tenemos una bomba de calor el COP no es fijo y dependerá de las condiciones de operación y temperaturas.

La temperatura mínima (T_{min}), es la temperatura mínima media de diseño del líquido a la entrada/salida de la sonda geotérmica. El fluido geotérmico intercambia calor en el evaporador en invierno y en el condensador en verano debido a la diferencia de temperaturas que existe entre el fluido geotérmico y el fluido de la bomba de calor. El T_{min} determina la temperatura mínima necesaria para que ocurra el cambio de estado de líquido a gaseoso y ocasiona que el trabajo realizado en el compresor sea el mínimo posible.

En el caso de Talca, la temperatura de entrada del fluido al evaporador fue 12° C (elegida) y la de salida del evaporador (calculada) fue 8,9°, se puede afirmar que durante el transcurso del líquido que salió del evaporador a 8,9°C y circuló por el intercambiador cerrado obtuvo 3,1° C (esta es la energía geotérmica extraída) del suelo del Talca. En el caso de Manzanar la temperatura de entrada al evaporador era de 5° C (elegida) y se demostró que la temperatura de salida del evaporador era de 0.8° C, lo que significa que absorbió 4.2° C de la tierra.

La longitud del intercambiador enterrado está relacionada con la extensión de las tuberías que circulan por el pozo. A través de esta medición se puede determinar con exactitud la profundidad del pozo requerido para calentar la vivienda. La longitud del intercambiador de calor depende de la carga térmica de la vivienda, pues cuanto mayor es la carga térmica mayor tendrá que ser la potencia de la bomba de calor para suplir la demanda. Cuanto mayor es la demanda requerida mayor es la longitud de la tubería y la posibilidad de que se haga más de una perforación.

Basándose en el hecho de que la conductividad térmica es la capacidad que un material tiene de conducir calor, los suelos cuya conductividad térmica son inferiores a $1,5 \left[\frac{W}{mK} \right]$ son considerados suelos inapropiados para la implementación de esta tecnología y generalmente tienen la tasa de extracción de calor (sHE) muy baja. Tanto en el caso de Talca cuya conductividad térmica es $2,4 \left[\frac{W}{mK} \right]$ como en el caso de Manzanar que es $2,2 \left[\frac{W}{mK} \right]$ son clasificados como suelos apropiados para esta práctica, son suelos con contenido de agua considerable y generalmente tiene una tasa de extracción de calor alta.

Aunque se haya calculado la profundidad a perforar del pozo usando el sHE promedio, hay que considerar que este es un valor sugestivo y está ampliamente ligado con la profundidad del pozo estratigráfico usado, y dado que la profundidad a perforar tiende a ser mayor o igual al pozo muestreado, el sHE promedio tiende a ser representativo. Por ende, sirve para analizar el tipo de material rocoso existente, su contenido en agua, y la tasa de calor que se puede extraer.

La ecuación para calcular la longitud del intercambiador es una simplificación de la desarrollada por Ingersoll (1948) y presentada por Kavanaugh and Rafferty (1997). No tienen en cuenta el posible desequilibrio térmico a largo plazo que podría alterar la temperatura del suelo, si existen diferencias significativas entre el calor inyectado y extraído al suelo durante un largo periodo de años. Sin embargo, esta simplificación es aceptable en el caso de un estado de evaluación preliminar y para equipos de pequeña potencia.

Es importante resaltar que para implementar el método BHE, es necesario un estudio detallado de la estratigrafía del lugar a implementar, pues eso indicará la conductividad térmica, resistividad del suelo y tasa de calor que puede ser recolectado en el lugar. Todas estas variables pueden ser medidas de una forma más efectiva a través del TRT.

5.2 ¿Realmente vale la pena la geotermia de baja entalpía?

Para contestar a esta pregunta se va a comparar la energía geotérmica de baja entalpía con dos combustibles muy usados en Chile (la leña y el pellet) y se analizará en dos aspectos importantes: Estudio Económico y Estudio ambiental.

5.2.1 Estudio económico

La leña es una madera utilizada para hacer fuegos en estufas, es el combustible más usado en Chile, tiene bajo costo y de fácil acceso. Una familia chilena cuya casa es de 100 m² gasta aproximadamente 40.000 pesos mensuales en la compra de leña, el gasto anual es de aproximadamente 480.000 pesos chilenos.

Los Pellet son pequeños cilindros de serrín, viruta, astillas y otros restos de la industria de la madera y agraria, elaborados mediante compresión. El precio promedio del pellet es 18 kg por 4 mil pesos chilenos, una caldera a pellet consume en media 1 kg de pellet por hora, si consideramos que una estufa se queda encendida entre 7-8 horas son 8 kg de pellet por día.

Los ahorros en las instalaciones con BCGT (Bombas de calor Geotérmica) se generan por el menor consumo de electricidad, por los escasos costes de mantenimiento y por la mayor duración de la vida útil que otros sistemas. Se estima que el ahorro energético en comparación con los sistemas convencionales de calefacción y refrigeración (gas-oíl, gas o electricidad), puede situarse entre 30 y 70%, pues la electricidad que los genera se emplea únicamente para recolectar, concentrar y suministrar el calor, no para producirlo. Así mismo, la inversión se amortiza en un periodo estimado de entre 6 y 14 años, sin tener en cuenta posibles subvenciones que puedan acortar este plazo.

Para la obtención de este ahorro energético es necesario realizar un desembolso económico inicial superior al requerido para la instalación de tecnologías tradicionales. Por lo tanto, la bomba de calor geotérmica se amortiza mediante el ahorro energético que tiene.

5.2.2 Estudio ambiental

La leña es altamente contaminante, una forma directa de contribuir a la disminución de material particulado es prohibir el uso de la leña. Sin embargo, esta solución es difícil de

implementar porque su fácil acceso y bajo costo hace que sea el combustible más usado en Chile para calefacción.

Otra solución es bajar la cantidad de humedad en la leña, ya que la leña seca es más eficiente en términos energéticos, por ser más eficiente se ocupa menos leña y, por tanto, hay menos partículas en el aire. Pero para eso es necesario que existan órganos fiscalizadores que impidan la comercialización de madera que poseen más de 20% de humedad.

La biomasa (pellets) no tiene impacto ambiental. Aunque las calderas de pellets sí emiten CO₂, lo que ocurre se entiende que este CO₂ ha sido previamente capturado de la atmósfera por la masa forestal a partir de la cual se han elaborado los propios pellets, por lo que la balanza de emisiones queda a cero, es decir, no añade CO₂ nuevo en la atmósfera. Sin embargo, debido a que es fabricado industrialmente, es necesario que existan órganos fiscalizadores para comprobar que no ocurra adulteración del producto.

La geotermia en cambio depende de un proceso en el que el ser humano no influye nada. Nunca habrá un momento en el que se pueda dudar de la sostenibilidad de una calefacción basada en la geotermia, pues la energía de la que se vale se renueva día a día de forma natural.

Otro aspecto para tener en cuenta es el factor temperatura. Debido a que los pellets poseen un poder calorífico muy grande, trabajan con temperaturas de impulsión más alta y pueden combinarse con radiadores, fancoils o suelo radiante. Mientras que la calefacción por geotermia es una tecnología de climatización de baja temperatura, por lo tanto, conseguirá el máximo de eficiencia trabajando con sistemas de baja temperatura como el suelo radiante y radiadores de baja temperatura.

Por otra parte, la geotermia tiene doble funcionalidad, puede proporcionar calor en el invierno y frío en el verano, aspecto por el cual le saca ventaja a la biomasa.

Otro factor por considerar es que la biomasa necesita de un sistema de silos textil para almacenar los pellets, lo que implica un espacio adicional en la vivienda.

Por lo demás, tanto la biomasa como la geotermia son métodos de climatización sostenibles, renovables y eficientes. Apostar en cada una de ellas representa una buena inversión, todo depende del dinero que estemos dispuestos a invertir.

5.2.3 Mi recomendación

- Para una vivienda unifamiliar de unos 100 m² aproximadamente, teniendo en cuenta que la geotermia necesita de una inversión inicial que suele ser bastante elevada

debido principalmente a las perforaciones, y sumando el hecho de que dependiendo de la demanda energética se necesitará espacio para más de 1 perforación, se recomienda el uso de calderas a pellet, ya que sirven para calefaccionar casa en el invierno y calentar agua caliente.

- En casos de edificaciones de gran tamaño, como escuelas, universidades u hospitales se recomienda el uso de climatización por bomba de calor geotérmicas. Aunque el monto de inversión inicial sea grande, el beneficio que estas instituciones tendrían a largo plazo valdría mucho más en cuenta, sin hablar de que no se necesitaría de otro método de refrigeración en verano en caso de usarse bomba geotérmica reversa.

6. CONCLUSIONES

Chile es un país con gran potencial geotérmico, pero a pesar de eso la energía geotérmica es una de las energías renovable no convencional menos conocida y explorada en Chile, debido principalmente al alto costo de inversión que este sistema propone. No obstante, con la creciente demanda energética chilena y la escasez de los combustibles fósiles, sumando la alta contaminación atmosférica por el alto consumo de leña, se incrementa la necesidad de implementar energías alternas en la tentativa de cubrir la demanda energética y atenuar la contaminación atmosférica.

La geotermia de muy baja entalpía para climatización de edificios es una excelente herramienta de inversión a largo plazo, es rentable por sí misma, es amigable con la naturaleza y es factible de ser utilizada en prácticamente cualquier zona geográfica.

El intercambio de calor de los sistemas BHE depende de las propiedades térmicas, del contenido de agua del suelo y de la velocidad de flujo de las aguas subterráneas. Para una correcta estimación del potencial geotérmico para intercambiadores verticales es necesario conocer la naturaleza de los materiales del área de estudio con mayor precisión. Se recomienda usar TRT, ya que es el método más eficiente para determinar las propiedades térmicas del terreno.

El conocimiento de las cargas térmicas es imprescindible, como paso previo para acometer la tarea de diseñar el sistema de acondicionamiento del aire interior y es fundamental para elegir la bomba de calor necesaria para suplir la demanda requerida.

La calidad del terreno tiene una gran influencia en la transferencia de calor. Hay terrenos más favorables que otros a lo hora de intercambiar calor. En este sentido una mayor longitud de sonda requerirá también una mayor inversión. Por ello, el tipo de terreno donde se asiente la edificación condicionará en gran medida el precio de la instalación.

Un terreno favorable podría garantizar el retorno de la inversión en un periodo de tiempo corto y el éxito de la instalación; mientras que uno desfavorable podría no hacerla rentable económicamente.

El suelo de la ciudad de Talca y del poblado de Manzanar son clasificados como suelos apropiados para la implementación de esta tecnología y ambos puntos de estudio presentan propiedades térmicas favorables.

Ambos casos teóricos citados en esta tesis son factibles de ser aplicados.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Aguasol. (2016). Estado de desarrollo de proyectos de bombas de calor Geotérmicas instalados en Chile. Informe Final. 217 p.
- [2] Alcor Rodrigues. Cálculo de una instalación Geotérmica (s.f). Trabajo final de grado, Universidad Politécnica de Catalunya BarcelonaTECH. 55 pp.
- [3] Andújar Márquez, J. M., Martínez Bohórquez, M. Á., & Gómez Melgar, S. (2016). Ground Thermal Diffusivity Calculation by Direct Soil Temperature Measurement. Application to Very Low Enthalpy Geothermal Energy Systems. *Sensors*, 16(3), 306.
- [4] Arenas, A. Z (2013). Modelación térmica del suelo alrededor de tubos enterrados en sistemas de recolección de energía geotérmica de baja entalpía. Memoria de Título, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile. 60 pp.
- [5] Asociación técnica española de climatización y refrigeración (ATECYR) (2012). Guía técnica: diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado.
- [6] Banks, D. (2012). An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling. UK: Holymoor Consultancy Ltd.
- [7] Cabello Traverso, D. A (2017). Estimación del potencial geotérmico de baja entalpía para implementar bombas de calor geotérmicas en la ciudad de Temuco, Región de la Araucanía. Memoria de Título, Departamento de Geología, Universidad de Chile. 90 pp.
- [8] Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1959). Conduction of heat in solids. Oxford University Press.
- [9] Catálogo CIAT AGEO (2011). Equipos bomba de calor agua-agua reversible con grupo hidráulico tanto en el circuito de capitación como en el interior.
- [10] Corporación Regional de Desarrollo Productivo; Región del Libertador Bernardo O'Higgins (2017). Energía geotérmica de muy baja entalpía. 90 pp.
- [11] Eskilson (1987). Thermal análisis of heat extraction boreholes. Sweden. University of Lund.
- [12] Ferroplast. Sistema de geotermia: Ferroterm. 36 pp.
- [13] Freedman Pacheco, M. F (2018). Estudio del potencial ecológico y económico para desarrollo productivo de pequeña minería del prospecto Poñen, Región del BioBío. Memoria de Título, Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Concepción. 111 pp.

- [14] Gaínza, V. (2014). Estimación del potencial geotérmico de baja temperatura, mediante el uso de bombas de calor geotérmicas, en la cuenca del Maule, entre los 35, 2° y 35, 6° S. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología. 127 pp.
- [15] García, F. (1968). Estratigrafía del Terciario de Chile central. En El Terciario de Chile Zona central (Cecioni, G.; editor). Editorial Andrés Bello: 25-57. Santiago.
- [16] GCF Ingenieros Ltda. (2010). Levantamiento de información hidrogeológica para modelación de la cuenca Río Maule. Ministerio de Obras Públicas; Dirección general de aguas. 193 pp.
- [17] Gemelli, A., Mancini, A., & Longhi, S. (2011). GIS-based energy-economic model of low temperature geothermal resources: A case study in the Italian Marche region. *Renewable energy*, 36(9), 2474-2483.
- [18] GSHPA. (2012). Thermal Pile Design, Installation and Materials Standards, Ground Source Heat Pump Association. http://www.gshp.org.uk/GSHPA_Thermal_Pile_Standard.html.
- [19] Ingersoll, L.R. & Plass, H.J. (1948). Theory of the ground pipe heat source for the heat pump. *Heating Piping & Air Conditioning*. 119-22.
- [20] J. Acuña, B. Palm (s.f). Local conduction Heat Transfer in U-pipe Borehole Heat Exchanges. The Royal Institute of Technology KTH. Brinellvagen 68, 100 44 Stockholm Sweden.
- [21] J. Lopez Lopez. (2014). Diseño y cálculo de la climatización de una vivienda unifamiliar mediante energía geotérmica. Memoria de Título, Universidad de TAUJA.
- [22] Kusuda, T & Achenbach, P.R (1965). Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States.
- [23] Ministerio de Energía (2016). Quién es quién, en sistemas geotérmicos con bombas de calor. Documento elaborado en el marco del proyecto “Estado de desarrollo de proyectos de bombas de calor geotérmicas instalados en Chile” desarrollado por AIGUASOL para CIFES. 60 pp.
- [24] Monzó, P. (2011). Comparison of different Line Source Model approaches for analysis of Thermal Response Test in a U-pipe Borehole Heat Exchanger. Estocolmo.
- [25] Morgensen, P., (1983). Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storage. In: *Proceedings of the International Conference on Surface Heat Storage in Theory and Practice*, Stockholm, Sweden, 652–657.

- [26] Ochoa Espinoza, F. P (2019). Análisis de la variación de temperatura en pozo geotérmico para la obtención de una correlación con resistencias térmicas involucradas. Memoria de Título, Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción. 71 pp.
- [27] Schorr Rubio, J. A (2017). Cuantificación del potencial geotérmico de baja temperatura, mediante sistemas de información geográfica, para la implementación de bombas de calor geotérmicas para calefacción en la ciudad de Talca. Memoria de Título, Departamento de Geología, Universidad de Chile. 99 pp.
- [28] Seisdedos Saez, M. A. (2012). Climatización de edificios por medio del intercambio de calor con el subsuelo y agua subterránea, aspectos a considerar en el contexto local. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología. 131 pp.
- [29] Servicio Nacional de Geología y Minería-Chile (s.f) (Sernageomin); Congreso Geológico Chileno 1992. Estratigrafía del terciario del sector occidental de la depresión central entre los 37° y 38° S, Chile. 5 pp.
- [30] Troncoso, R.; Arenas, M.; Jara, C.; Milovic, J.; Pérez, Y. (2007). Geología para el ordenamiento territorial: área de Temuco, Región de La Araucanía. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental 11: 67 p., 6 mapas escala 1:100.000. Santiago.
- [31] UNTEC (2014). Alternativas tecnológicas para la calefacción residencial con energías renovables no convencionales aplicables a la realidad chilena. Programa de gestión y economía ambiental. 210 pp.
- [32] Uribe Mansilla, J. A (2018). Estudio de prefactibilidad técnico-económico en la implementación de Energía Renovable No convencional para mejorar la eficiencia energética de la escuela Kimun Lawal de Alerce, Puerto Montt. 160 pp.
- [33] Vargas Alejandro (2015). Análisis de sensibilidad numérica de tests de respuesta térmica en pilotes automáticos. Memoria de título, departamento de ingeniería Civil, Universidad de Chile. 74 pp.
- [34] VDI. VDI 4640 Thermal Use of the Underground. 2001-2010.Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure. 4 volúmenes.
- [34] Vielma Sossa, M. S. (2013). Diseño e integración de energía geotérmica de baja entalpía aplicada a proyectos de construcción residencial. Memoria de Título, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. 128 pp.

8. ANEXOS

8.1 Conductividad Térmica y Capacidad Calórica para distintos materiales

Tabla 15: Valores representativos de conductividad y capacidad térmica para distintos materiales. Extraído de guía técnica de ATECYR, 2013.

Tipo de roca	Conductividad térmica (W/mK)			Capacidad térmica volumétrica (MJ/m ³ K)
	Min.	Valor típico	Máx.	
Rocas magmáticas				
Basalto	1,3	1,7	2,3	2,3 - 2,6
Diorita	2	2,6	2,9	2,9
Gabro	1,7	1,9	2,5	2,6
Granito	2,1	3,4	4,1	2,1 - 3,0
Periodita	3,8	4	5,3	2,7
Riolita	3,1	3,3	3,4	2,1
Rocas metamórficas				
Gneis	1,9	2,9	4	1,8 - 2,4
Mármol	1,3	2,1	3,1	2
Metacuarcita		Aprox. 5,8		2,1
Mica esquistos	1,5	2	3,1	2,2
Esquistos arcillosos	1,5	2,1	2,1	2,2 - 2,5
Rocas sedimentarias				
Caliza	2,5	2,8	4	2,1 - 2,4

Marga	1,5	2,1	3,5	2,2 - 2,3
Cuarcita	3,6	6	6,6	2,1 - 2,2
Halita	5,3	5,4	6,4	1,2
Arenisca	1,3	2,3	5,1	1,6 - 2,8
Limolitas y argilitas	1,1	2,2	3,5	2,1 - 2,4
Roca no consolidada				
Grava, seca	0,4	0,4	0,5	1,4 - 1,6
Grava, saturada de agua		Aprox. 1,8		Aprox. 2,4
Arena, seca	0,3	0,4	0,8	1,3 - 1,6
Arena, saturada de agua	1,7	2,4	5	2,2 - 2,9
Arcilla/limo, seco	0,4	0,5	1	1,5 - 1,6
Arcilla/limo, saturado de aguas	0,9	1,7	2,3	1,6 - 3,4
Turba	0,2	0,4	0,7	0,5 - 3,8

8.2 Estratigrafía

Los pozos utilizados para el perfil estratigráfico son los siguientes:

8.2.1 Perfil estratigráfico este- oeste (Talca)

Tabla 16: Perfil estratigráfico de Talca (perfil este - oeste). Extraído de la tesis Rubio Jaime, 2017.

Código del pozo	Desde [m]	Hasta [m]	Litología	SHE usado flujo normal [W/m]	SHE usado alto flujo [W/m]
AA90	0	1.5	Vegetal	0	0
	1.5	17	Arena	70	90
	17	20	Grava en matriz de limo y/ o arcilla	70	90
	20	32	Grava en matriz de arena	70	90
	32	40	Grava	70	90
	40	50	Limo con fragmentos de grava	40	40
	50	60	Grava	70	90

8.2.2 Perfil estratigráfico Manzanar

Tabla 17: Perfil estratigráfico de Manzanar. Extraído de Sernageomin, 1991.

Desde [m]	Hasta [m]	Litología	SHE usado flujo normal [W/m]
0	250	Limonitas	40
250	500	Areniscas finas	65
500	1500	Lavas andesíticas	50
1500	1750	Areniscas	65
1750	2000	Conglomerado s	70

8.3 Cálculo de la carga térmica para la vivienda en Talca

La envolvente térmica del edificio está compuesta por todos los cerramientos que limitan los espacios habitables con el ambiente exterior. La siguiente tabla (tabla 18) muestra los valores de los cerramientos elegidos para esta tesis, esos valores fueron extraídos de la tesis de Juan Lopez (2017).

La cubierta representa la zona superior de la vivienda, ella limita con el aire exterior a las condiciones exteriores de diseño. El suelo es la zona inferior de la vivienda. La fachada cada una de las paredes verticales de la vivienda que limitan con el aire exterior a las condiciones exteriores de diseño, su orientación es importante. El hueco se considera uno de los elementos más débiles desde el punto de vista del aislamiento térmico.

Luego se procede el cálculo de las cargas térmicas internas (calor de las personas y equipos) y externas (transmisión, renovación e infiltración) de la vivienda.

- **Cálculo de QTransmisión**

Para calcular el QTransmisión es necesario saber los valores de la transmitancia de cada envolvente térmico del edificio, lo cual está compuesto por cerramientos que limitan los espacios habitables con el ambiente exterior, para este caso se considera como habitable cada espacio de la vivienda.

La Transmitancia es una magnitud que expresa la cantidad de energía que atraviesa un cuerpo en la unidad de tiempo. Para este caso, usaremos los siguientes valores de transmitancia para los distintos cerramientos:

$$Q_{\text{transmisión}} = \sum U_i * A_i * (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})$$

donde,

- U_i = Transmitancia térmica del cerramiento "i" [$\frac{W}{m^2 K}$].
- A_i = Superficie del cerramiento "i" en contacto con el exterior [m^2].
- T_{int} = Temperatura interior de la vivienda en invierno (22°C).
- T_{ext} = Temperatura del ambiente exterior en invierno (0,8°C).

Tabla 18: Valores de cerramiento. Extraído de la tesis de J.Lopez Lopez, 2014.

Cerramiento	Valor de la transmitancia ($W/m^2 \cdot K$)	Valor límite de transmitancia ($W/m^2 \cdot K$)
Fachada	0,56	0,73
Cubierta	0,40	0,41
Suelo (contacto con terreno)	0,61	0,73
Huecos (orientación este)	2,85	3,9
Huecos (orientación sur)	2,85	4,4
Huecos (orientación oeste)	2,85	3,9

Luego el QTransmisión será:

$$Q_{\text{Transmisión}} = 5317,49 \text{ W}$$

- **Cálculo de Qrenovación**

$$Q_{\text{renovación}} = m * C_{\text{paire}} * (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})$$

donde,

- m = Caudal volumétrico del aire de renovación $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$; se calcula como el volumen del aire del edificio renovado cada hora, siendo la densidad del aire de $1,18 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ (superficie x altura x densidad / 3600 segundos).
- C_{paire} = Calor específico del aire ($C_{\text{paire}} = 1000 \left[\frac{\text{J}}{\text{kgK}}\right]$).

El Qrenovación es:

$$Q_{\text{renovación}} = \frac{115 * 2,8 * 1,18}{3600} * 1000 (22 - 0,8) = 2237,5 \text{ W}$$

Donde el 2,8 es la altura de la vivienda y el 115 la superficie de la vivienda.

- **Cálculo de Qinfiltración**

$$Q_{\text{infiltración}} = m * C_{\text{paire}} * (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})$$

donde,

- m = Caudal volumétrico del aire de infiltración $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$, que se estima en un 25% del caudal volumétrico del aire de renovación.
- C_{paire} = Calor específico del aire ($C_{\text{paire}} = 1000 \left[\frac{\text{J}}{\text{kgK}}\right]$).

Luego, el Qinfiltración será:

$$Q_{\text{infiltración}} = Q_{\text{renovación}} * 0,25 = 559,37 \text{ W}$$

- **Cálculo de Qpersonas**

$$Q_{\text{personas}} = n^{\circ} \text{ personas} * q_{1\text{persona}}$$

donde,

- $q_{1\text{persona}}$ = Calor que desprende una persona [$\sim 100 \text{ W/persona}$].
- $n^{\circ}\text{personas}$ = Número de personas que habitan en la vivienda.

Luego, el Q_{personas} será:

$$Q_{\text{personas}} = 4 * 100 = 400 \text{ W}$$

Donde el 4 es el número de personas que viven en la vivienda y el 100 el calor que cada uno desprende.

- **Cálculo de Qequipos**

$$Q_{\text{equipos}} = \Sigma n^{\circ} \text{ equipoi} * Poti + \Sigma Silum * Potilum$$

donde,

- $n^{\circ} \text{ equipoi}$ = Número de equipos iguales.
- $Poti$ = Potencia del equipo [W].
- $Silum$ = Superficie iluminada [m^2].
- $Potilum$ = Potencia de iluminación de un espacio [$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$].

Usando la ecuación 15 y considerando que la potencia de iluminación media considerada corresponde a 10W/m^2 y en el caso de equipos, consideramos 3.000 W como potencia unitaria correspondiente a la cocina-comedor. Tendremos que la carga térmica de los equipos será:

$$Q_{\text{equipos}} = 3157,50 \text{ W}$$

Sumando todos los resultados obtenidos en los cálculos de las respectivas cargas térmicas, tendremos que la carga térmica total de la vivienda es la siguiente:

$$Q_{\text{térmico}} = 5317,49 + 2237,5 + 559,37 - 400 - 3157,50 = 4556,8 \text{ W}$$

8.4 Valores de la resistencia térmica de la tubería HDPE PE 100

Tabla 19: Principales características de los tubos. Extraído de la guía técnica ATECYR, 2013.

Tubería HDPE PE 100							
Diámetro Nominal D (mm)	Diámetro Nominal Equivalente (pulgadas)	Relación dimensional estándar SDR					
		SDR 27,6	SDR 21	SDR 17	SDR 13,6	SDR 11	SDR 9
		PRESION NOMINAL PM					
		PN 6	PN 8	PN 10	PN 12,5	PN 16	PN 20
		Espesor mínimo (mm)					
16	3/8	-	-	-	-	-	2,3
20	1/2	-	-	-	-	-	2,3
25	3/4	-	-	-	-	2,3	2,8
32	1	-	-	2,3	2,4	3	3,6
40	1 1/4	-	2,3	2,4	3	3,7	4,5
50	1 1/2	2,3	2,4	3	3,7	4,6	5,6
63	2	2,3	3	3,8	4,7	5,8	7,1
75	2 1/2	2,8	3,6	4,5	5,6	6,8	8,4
90	3	3,6	4,3	5,4	6,7	8,2	10,1
110	4	4	5,3	6,6	8,1	10	12,3
125	5	4,6	6	7,4	9,2	11,4	14
140	5 1/2	5,1	6,7	8,3	10,3	12,7	15,7

8.5 Tabla de la tasa de extracción térmica para captación vertical

Tabla 20: Valores típicos de la tasa de extracción de calor. Extraído de guía técnica (ATECYR), 2013.

Extracción térmica captación vertical	Horas de funcionamiento por año	
Tipos de suelo – Valores generales	1800 h	2400 h
Inapropiado. Sedimento seco. Conductividad térmica < 1,5 W/mK	25 W/m	20 W/m
Normal. Roca consolidada. Sedimento saturado de agua. Conductividad térmica < 3 W/mK	60 W/m	50 W/m
Roca consolidad. Elevada conductividad térmica Conductividad térmica > 3 W/mK	84 W/m	70 W/m
Tipo de Suelo		
Gravilla, arena. Seco	< 25 W/m	< 20 W/m
Gravilla, arena. Con agua	65 – 80 W/m	55 – 85 W/m
Zona freática a través de gravilla y arena	80 – 100 W/m	55 – 85 W/m
Arcilla, limo. Húmedo	35 – 50 W/m	30 – 40 W/m
Piedra caliza	55 – 70 W/m	45 – 60 W/m
Piedra arenisca	65 – 80 W/m	55 – 65 W/m

Granito	65 – 85 W/m	55 – 70 W/m
Basalto	40 – 65 W/m	35 – 75 W/m
Gneis		60 – 70 W/m