



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALURGICA**



MEMORIA DE TÍTULO

**ESTUDIO PRELIMINAR DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO RENOVABLE
DEL SUBSUELO DE LA REGIÓN DEL BIOBÍO.**

POR

Cristóbal Antonio Torres Valenzuela

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero(a) Civil de Minas

Profesor Guía:
Ramón Díaz Noriega

Marzo 2026
Concepción (Chile)

RESUMEN

Este trabajo desarrolla la evaluación del potencial geotérmico renovable de baja entalpía en el subsuelo de la Región del Biobío. El objetivo principal es construir una línea base regional que permita identificar, de forma preliminar, la factibilidad para el aprovechamiento térmico del recurso mediante sistemas geotérmicos someros, aportando valores referenciales de potencia de captación y estableciendo limitaciones e incertidumbres propias de un estudio a escala regional.

La metodología se basa en la implementación de dos enfoques de cálculo integrados en el software ArcGIS. El método sHE (sondas geotérmicas verticales cerradas) utilizado en la región, exceptuando una parte de la Cordillera de los Andes, zona que está relacionada con alta actividad volcánica y el método de captaciones horizontales (colectores someros) aplicado a la totalidad de la región. El estudio se sustenta exclusivamente en datos de dominio público y supuestos bibliográficos, utilizando cartografía a escala 1:1.000.000 (mapas geológicos de SERNAGEOMIN, edafológicos de SOTERLAC y balances hídricos), priorizando la reproducibilidad de los resultados.

Los resultados se presentan mediante mapas temáticos y estadísticas descriptivas que permiten comparar el comportamiento espacial del recurso para configuraciones verticales y horizontales. Para el método sHE, siguiendo valores tabulados y condiciones de saturación/litología, las potencias específicas de captación estimadas varían entre 42,3 y 90 $\left[\frac{W}{m}\right]$, con un promedio regional de 59 $\left[\frac{W}{m}\right]$, lo que sugiere un potencial moderado y relativamente homogéneo para instalaciones verticales cerradas en gran parte del territorio evaluado. En el caso de las captaciones horizontales, mediante una formulación reducida basada en la conductividad térmica (k) y la difusividad térmica (α), se obtuvo un rango de valores de potencial geotérmico superficial para instalaciones a 2 [m] de profundidad entre -9,74 y 13,2 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$, siendo los valores positivos aquellos en que el suelo aporta calor al sistema, útil para calefacción, y los valores negativos indican cuando el suelo extrae calor del sistema, es decir, el suelo actúa como disipador térmico y enfriando ambientes.

ABSTRACT

This work assesses the renewable low-enthalpy geothermal potential of the subsurface in the Biobío Region. The main objective is to build a regional baseline that supports a preliminary identification of the technical feasibility of using shallow geothermal systems for thermal applications, providing reference values of capture power while acknowledging the limitations and uncertainties inherent to a regional-scale assessment.

The methodology implements two integrated calculation approaches within ArcGIS. The sHE method (vertical closed-loop borehole heat exchangers) is applied across the region, excluding a sector of the Andes associated with high volcanic activity where the approach is not applicable, while the shallow horizontal-collector method is applied to the entire region. The study relies exclusively on public-domain data and bibliographic assumptions, using 1:1.000.000 scale cartography (SERNAGEOMIN geological maps, SOTERLAC soil data, and water-balance products) and prioritizing reproducibility.

Results are presented through thematic maps and descriptive statistics that compare the spatial behavior of the resource for vertical and horizontal configurations. For the sHE method, using tabulated reference values and saturation/lithology conditions, estimated specific capture power ranges from 42,3 to 90 $\left[\frac{W}{m}\right]$, with a regional average of 59 $\left[\frac{W}{m^1}\right]$, suggesting a moderate and relatively homogeneous potential for closed-loop vertical installations over much of the evaluated territory. For horizontal collectors, a reduced formulation based on thermal conductivity (k) and thermal diffusivity (α) yields values at 2 m depth ranging from -9,74 to 13,2 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$. Positive values indicate conditions in which the ground supplies heat to the system, supporting heating applications, whereas negative values correspond to periods when the ground acts as a thermal sink, extracting heat from the system and thereby providing cooling.

AGRADECIMIENTOS

Mi eterno agradecimiento a mis padres Juan y Carla, que desde el primer segundo fueron mentor, pilar y guía durante toda mi etapa universitaria y durante toda mi vida, convirtiéndome gracias a ellos en la persona que soy ahora.

A mi pareja Cinthia, que ha sido mi más grande apoyo en el último tramo del proceso, aquella que también me ha enseñado a vivir de una forma distinta y me dio un lugar en el que sentirme seguro de una forma diferente.

A mis grandes amigos Carlos y Josué, que fueron las primeras personas con las que hable el primer día volviendo a la presencialidad. Sentados como los pollitos que éramos afuera del TM, sin saber que era el TM tratando de adivinar cual era nuestra primera sala de clases, lo cual fue el inicio de una larga y divertida experiencia.

A mis otros amigos que hice en la universidad, Alfredo, Pancho, Brunito, Jony, Nico, Thomas, Valeria, Kiomca y Juan. Que son aquellas personas con las que compartí durante toda la carrera, aunque en menor medida, todo este proceso no habría sido para nada si no fuera por ellos.

A mis amigos de la adolescencia que aún siguen conmigo Pablo, Kevin, Melody, Gustavo y Javiera, han sido un apoyo en los momentos más difíciles y grandes compañeros siempre, desde el inicio de los tiempos.

Al resto de mi familia, a mis abuelos, mis tíos y mis primos, que, a pesar de no tener la mejor comunicación, nunca he dudado y siempre demuestran el gran apoyo, amor, y cariño que sienten hacia mí.

A todos los profesores que fueron parte del proceso, destacando al profesor Ramón, que cada uno con su propia forma de impartir la enseñanza me dieron una base profesional que me acompañará el resto de mi vida.

A la gente del Chiflón del Diablo, que fueron docentes, colegas y amigos durante una hermosa, muy enriquecedora y amena práctica profesional.

Y, por último, me agradezco a mí mismo por ser constante, por no rendirme, por llegar hasta aquí a través de un camino que fue muy divertido, pero no fue fácil.

A todos, muchas gracias.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Contextualización general	1
1.2	Hipótesis del proyecto	2
1.3	Objetivos	3
1.3.1	Objetivo general	3
1.3.2	Objetivos específicos.....	3
1.4	Alcances y Limitaciones	3
1.5	Metodología general del trabajo.....	4
2	ANTECEDENTES GENERALES	7
2.1	Fundamentos de la energía geotérmica	7
2.2	Tecnologías de aprovechamiento de los recursos geotérmicos.....	8
2.2.1	Bomba de calor geotérmica.....	8
2.2.2	Sistemas de captación geotérmica de muy baja entalpía:	9
2.3	Estado actual de la geotermia en el mundo	13
2.4	Estado actual de la geotermia en Chile	15
2.4.1	Normativa Chilena en geotermia.....	16
2.4.2	Barreras normativas en la explotación de la energía geotérmica en Chile.....	18
3	Antecedentes de la zona de estudio	19
3.1.1	Ubicación de la región [40]:.....	19
3.1.2	Clima:	20
3.1.3	Características del suelo:	21
3.1.4	Características geológicas:	21
3.1.5	Hidrogeología:.....	23
3.1.6	Exigencias térmicas de calefacción y enfriamiento para la región del Biobío.....	24
4	MARCO TEÓRICO	25
4.1	Conceptos generales	25
4.2	Generación de modelo para el cálculo de potencial geotérmico para captaciones horizontales	26
4.3	Modelos de cálculo de potencial geotérmico para captaciones verticales	30
4.3.1	Método sHE (Specific Heat Exchanger) [55]	30
5	DESARROLLO METODOLÓGICO	32

5.1	Estimación del potencial geotérmico para sistemas horizontales	32
5.1.1	Selección de datos de entrada.....	32
5.1.2	Generación de mapas base	32
5.1.3	Generación de mapas de potencial geotérmico superficial	36
5.2	Método specific heat Exchanger (sHE).....	39
5.2.1	Selección de datos de entrada.....	39
5.2.2	Procesamiento de la información	40
6	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	48
6.1	Método de captaciones horizontales	48
6.1.1	Representación gráfica	48
6.1.2	Estadísticas generales.....	49
6.1.3	Interpretación del potencial geotérmico	50
6.1.4	Oportunidades de mejora	53
6.2	Método sHE.....	54
6.2.1	Representación gráfica	54
6.2.2	Estadísticas generales.....	55
6.2.3	Comparación de resultados	56
6.2.4	Interpretación del potencial geotérmico	56
6.2.5	Oportunidades de mejora	57
7	CONCLUSIONES	59
8	REFERENCIAS	61
9	ANEXO A: TABLAS	72
10	ANEXOS B: PARAMETROS	79
11	ANEXOS C: DESARROLLO MATEMÁTICO DEL MODELO DE CONDUCCIÓN DE CALOR	82
12	ANEXOS D: ESQUEMAS	90
13	ANEXOS E: MAPAS	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Funcionamiento básico de una bomba de calor [14].	9
Figura 2.2: Sondas geotérmicas, captaciones verticales cerradas [16].	10
Figura 2.3: Sonda coaxial. Fuente [19].	11
Figura 2.4: Sondas en pilotes estructurales [20].	11
Figura 2.5: Configuración tipo serpentín [18].	12
Figura 2.6: Sistema abierto con Reinyección [23].	12
Figura 2.7: Máxima capacidad de generación de energía a través de energía geotérmica a nivel mundial [25].	13
Figura 5.1: Mapa de los suelos que componen la región del Biobío [56].	33
Figura 5.2: Mapa de texturas según grupos de suelos de la región del Biobío.	34
Figura 5.3: Distribución mensual de los regímenes de humedad de la región del Biobío.	34
Figura 5.4: Mapa de regímenes de humedad de la región del Biobío.	35
Figura 5.5: Mapa combinado de Texturas y regímenes de humedad de la región del Biobío	37
Figura 5.6: Diferencia de temperatura entre la temperatura subterránea y la temperatura atmosférica para todos los meses del año.	39
Figura 5.7: Diferenciación de geologías rocosas y sedimentarias para toda la región del Biobío.	41
Figura 5.8: Representación de división de unidades sedimentarias saturadas y no saturadas.	44
Figura 5.9: Representación de la combinación de las capas que representa la columna de estudio en las zonas litorales sedimentarias.	45
Figura 6.1: Mapa de potencial geotérmico para sistemas de captación horizontales para cada mes del año.	49
Figura 6.2: Mapa de potencial geotérmico para sistemas de configuración vertical. Fuente: Elaboración propia.	55
Figura 12.1 Procesamiento de la información, método de captaciones horizontales.	90

Figura 12.2 Esquema de procedimiento por método sHE para captaciones verticales.	91
Figura 13.1 Mapa de potencial geotérmico calculado con el método sHE. Fuente Elaboración propia.	92
Figura 13.2 Mapa de potencial geotérmico superficial para captaciones horizontales para cada mes del año, Fuente Elaboración propia.	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de Recursos geotérmicos. Fuente “Manual de geotermia, IGME” [11]....	8
Tabla 2.2: Datos de uso global de energía geotérmica de aprovechamiento directo para climatización de espacios [27].....	14
Tabla 3.1: Demanda máxima de calefacción y enfriamiento para la región del Biobío kWh/m^2 [45].	24
Tabla 5.1: Propiedades térmicas según VDI 4640 (azul) y propiedades interpoladas [61].....	37
Tabla 5.2: Difusividad térmica calculada en base a Tabla 5.1. Fuente elaboración propia.	38
Tabla 5.4: Cálculo de potencias en [W] para el sector costero, donde el contacto sedimento–basamento puede darse dentro de los 100 [m] de profundidad del estudio.	46
Tabla 5.5: Operaciones de cálculo de potencia total en [W] de las unidades sedimentarias, incluido los basamentos costeros.....	46
Tabla 6.1: Estadísticas básicas de los resultados del método para captaciones horizontales.	49
Tabla 6.2: Estadísticas principales para el método sHE. Fuente Elaboración propia.	56
Tabla 9.1 Coberturas de fuentes externas utilizadas en el proyecto.....	72
Tabla 9.2 Proyectos geotérmicos de Chile	72
Tabla 9.3 Categorización de grupos de suelos [94].....	76
Tabla 9.4 Clasificación textural según tipo de suelo usado en el proyecto. Fuente [95 -101].	77
Tabla 9.5 Clasificación textural según composición. Fuente [102].	77
Tabla 10.1 Ejemplos de conductividad térmica y capacidad calorífica específica relacionada con el volumen del subsuelo. Fuente [61].....	79
Tabla 10.2 Valores de extracción específicos para sondas intercambiadoras, Fuente VDI 4640, parte 2	80
Tabla 10.3 Valores sHE asignados a secuencias geológicas de la región del Biobío, Fuente Elaboración propia.....	80

NOMENCLATURA

GIS	Geographic Information System
sHE	Specific Heat Exchanger
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
EGS	Enhanced Geothermal Systems
HDR	Hot Dry Rock
API	Application Programming Interface
WRB	World Reference Base for Soil Resources
ACS	Agua Caliente Sanitaria
IDE	Infraestructura de Datos Espaciales
SEC	Superintendencia de Electricidad y Combustibles
SOTERLAC	Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean
UTM	Universal Transverse Mercator
ESRI	Environmental Systems Research Institute
MMA	Ministerio de Medio Ambiente
MOP	Ministerio de Obras Publicas
DGA	Dirección General de Aguas
SERNAGEOMIN	Servicio Nacional de Geología y Minería
CEGA	Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes
ERNC	Energías Renovables No Convencionales

1 INTRODUCCIÓN

En este primer capítulo se plantea el contexto general de la energía geotérmica en Chile y el Biobío, se presentan los objetivos del estudio, se exponen los alcances y la metodología adoptada.

1.1 Contextualización general

En el actual escenario de crisis climática global, la transición energética se ha consolidado como un imperativo ineludible para las economías en desarrollo. El aumento sostenido de la demanda energética mundial, impulsado por el crecimiento demográfico y la industrialización, exige un cambio urgente desde matrices basadas en combustibles fósiles hacia fuentes renovables no convencionales (ERNC) [1], [2]. Chile, debido a su ubicación privilegiada en el Cinturón de Fuego del Pacífico, posee un gran potencial geotérmico desarrollable [3], [4], [5].

El desafío no se limita a la electricidad, sino que tiene otro polo importante en la energía térmica requerida para calefacción, enfriamiento y agua caliente sanitaria en edificaciones. En ese marco, la geotermia somera (baja entalpía) se presenta como una buena alternativa para climatización. Sin embargo, el aprovechamiento somero ha estado condicionado por factores regulatorios y, especialmente, por la disponibilidad de información técnica útil para etapas tempranas de evaluación.

En el ámbito local, la Región del Biobío se caracteriza por ser un polo de intensa actividad industrial, forestal y portuaria, sumado a centros urbanos con altos requerimientos de climatización residencial debido a las condiciones climáticas de la zona centro-sur. Históricamente, esta demanda térmica y hasta el día de hoy, ha sido satisfecha mediante combustibles fósiles o el uso de leña, lo que conlleva problemas asociados de contaminación atmosférica y saturación por material particulado [6]. En este contexto, el subsuelo de la región presenta una buena oportunidad para la implementación de sistemas geotérmicos que podrían reemplazar estas fuentes contaminantes, para calefacción distrital o domiciliaria.

A pesar de este potencial teórico, el uso de la geotermia somera en el Biobío es incipiente. El problema fundamental que frena su desarrollo no es la ausencia del recurso, sino la carencia de información técnica sistematizada y especializada.

Frente a este vacío de información, el presente proyecto instala su foco en la evaluación cuantitativa y espacial del recurso geotérmico de baja entalpía a nivel regional, diferenciando zonas aptas para distintas tecnologías de aprovechamiento. La aportación central de esta investigación radica en la construcción de un modelo integrado mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), aplicando 2 metodologías de cálculo. El método *Specific Heat Exchanger* (sHE) para sondas verticales y modelos de conductividad para captaciones horizontales someras. A través de este enfoque, se busca entregar una herramienta cartográfica inédita que reduzca la brecha de información y sienta las bases técnicas para futuros proyectos de inversión geotérmica en el Biobío.

1.2 Hipótesis del proyecto

La sistematización y el procesamiento geoespacial de información geológica, climática, edafológica e hidrogeológica de dominio público, mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), permiten establecer una línea base cuantitativa del recurso geotérmico somero (baja entalpía) en la Región del Biobío, apta para la identificación preliminar de zonas con factibilidad técnica para su aprovechamiento térmico.

Se plantea que, al diferenciar espacialmente el territorio e implementar metodologías específicas de evaluación para geotermia somera, el método sHE para captaciones verticales cerradas (aplicable en la mayor parte de la región, con exclusiones locales asociadas a alta actividad volcánica) y un modelo de captaciones horizontales someras aplicado a escala regional, es posible demostrar que el Biobío presenta un potencial de baja entalpía técnicamente viable para aplicaciones de climatización (calefacción y enfriamiento), con variaciones controladas principalmente por la litología/saturación en el caso de captaciones verticales y por las propiedades térmicas del suelo y su estacionalidad en el caso de captaciones horizontales

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar mapas de potencial geotérmico de muy baja entalpía para la región del Biobío mediante la aplicación de tecnologías SIG (Sistemas de Información Geográfica), utilizando distintos métodos de evaluación, con el fin de identificar zonas con factibilidad técnica para el aprovechamiento de energía del subsuelo para usos térmicos, considerando la disponibilidad de datos públicos y estableciendo una línea base regional que sirva como referencia para futuros estudios y proyectos de desarrollo geotérmico.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Identificar las tecnologías de aprovechamiento de energía geotérmica de baja entalpía y sus características
2. Identificar las metodologías de evaluación del potencial geotérmico de baja entalpía y adaptarlas para ser aplicables a entornos SIG.
3. Identificar los parámetros y las variables implicadas para cada metodología de evaluación, determinando la disponibilidad de información relevante y necesaria para aplicar correctamente las metodologías.
4. Construir una base de datos geoespacial para desarrollar los modelos de evaluación.
5. Desarrollar las metodologías con la información recopilada y evaluar el potencial geotérmico en la Región del Biobío utilizando GIS
6. Evaluar las limitaciones de cada modelo aplicado y proponer mejoras metodológicas y de información para futuros estudios de geotermia en la región.

1.4 Alcances y Limitaciones

La evaluación de potencial geotérmico de baja entalpía que se presenta en este trabajo se elabora exclusivamente en base a información pública disponible en los catálogos de distintas instituciones tanto gubernamentales como privadas y nacionales como internacionales.

La evaluación tiene un carácter preliminar y se ha llevado a cabo con fines académicos en un contexto de pregrado.

Además, debe tenerse en consideración que para el desarrollo de la evaluación de potencial geotérmico se han asumido determinadas simplificaciones y no serán consideradas:

1. El impacto de la cobertura de vegetación y el fenómeno de evapotranspiración
2. La influencia de la orientación del terreno y su exposición preferencial a la radiación solar.
3. La influencia de las discontinuidades geológicas.
4. Las características económicas de ningún tipo en relación con el estudio, exploración o explotación de recursos geotérmicos.
5. La influencia de la elevación del terreno.

Teniendo en cuenta las simplificaciones anteriores y el contexto académico en el que se desarrolla el presente trabajo, se aconseja tomar con precaución las evaluaciones propuestas.

1.5 Metodología general del trabajo

Este trabajo consta de 5 etapas descritas a continuación

1. Identificar metodologías

Recopilar información acerca de los métodos más utilizados y fiables extendidos por el mundo, ya que, para iniciar la evaluación de los recursos geotérmicos de la región es necesario tener una forma de cuantificarlos.

2. Recopilar información relevante

Recopilación y revisión bibliográfica de los principales estudios que sean útiles con respecto al estudio y aporten información al momento de generar mapas de potencial geotérmico.

3. Diseñar e implementar una base de datos

Creación de una base de datos que permita el fácil manejo de la información disponible y que además sea el pilar del diseño del modelo que se creará posteriormente.

4. Desarrollar mapas de potencial geotérmico

A partir de todo el trabajo previo realizado y con la ayuda de un Sistema de Información geográfica se procesarán los datos y a partir de ellos se generarán finalmente los mapas de potencial geotérmico somero a escala regional y local.

5. Analizar resultados

Se examinarán los datos procesados y modelados, estableciendo relaciones entre las variables estudiadas. Se realiza una comparativa con estudios externos utilizando herramientas visuales.

Para el desarrollo de este trabajo se ha utilizado ArcGIS Pro, que es un software de análisis geoespacial de última generación desarrollado por ESRI, una empresa estadounidense fundada en 1969 y reconocida mundialmente por liderar el desarrollo de tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (SIG por sus siglas en español). Un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS, por sus siglas en inglés: Geographic Information System) es una herramienta tecnológica que permite capturar, almacenar, analizar, gestionar y visualizar datos espaciales o geográficos. Un GIS combina información alfanumérica (atributos) con su ubicación en el espacio (coordenadas), lo que permite entender relaciones, patrones y tendencias espaciales.

Siendo ArcGIS PRO un software tan completo, es de esperar que requiera de un computador de capacidades no menores, ya que, recomiendan 32 GB de memoria RAM para buen rendimiento, pero hasta 64 GB de RAM para un rendimiento óptimo, un procesador o CPU recomendada de 4 núcleos, pero de 10 núcleos para un funcionamiento óptimo e idealmente una GPU o tarjeta gráfica dedicada con 4 GB de memoria o más.

En este caso, el computador usado para realizar este proyecto cumple en su mayor medida los requisitos recomendados por la plataforma oficial de ESRI [7] y el detalle sobre el dispositivo utilizado en este proyecto es el siguiente:

- **Dispositivo:** Notebook ASUS TUF Dash F15 FX516PC
- **Sistema operativo:** Windows 11 (64 bits)
- **CPU:** Intel(R) Core (TM) i7-11370H de 11th Generación, 3.30GHz y 4 núcleos
- **GPU:** NVIDIA GeForce RTX 3050 Laptop GPU con 4 GB de memoria.

2 ANTECEDENTES GENERALES

2.1 Fundamentos de la energía geotérmica

La energía geotérmica es la energía contenida en forma de calor al interior de la Tierra. Este calor se mueve constantemente desde el núcleo de la Tierra hasta la superficie [8]. Una evidencia de este fenómeno es la existencia de un aumento de temperatura en función de la profundidad, que se denomina gradiente geotérmico y generalmente es expresado en °C/ km con un promedio a nivel mundial de 30°C/km [9]. Aunque el gradiente geotérmico es variable y depende fundamentalmente de las características geológicas, de los fluidos existentes en el subsuelo y de los fenómenos de geodinámica interna que se manifiestan en la zona considerada.

Los sistemas geotérmicos, en primera instancia son definidos como elementos naturales que pueden existir en una misma área para hacer posible el aprovechamiento convencional de este recurso.

Para la evaluación técnica y económica de un proyecto geotérmico, es indispensable categorizar el recurso según su potencial energético. Esta clasificación se realiza habitualmente en función de la entalpía de los fluidos (cantidad de energía térmica que puede intercambiar el sistema) o, de manera más práctica, según la temperatura del reservorio, ya que esta variable termodinámica determina directamente la tecnología de explotación aplicable.

En términos generales, los recursos se dividen en sistemas de alta y media entalpía, capaces de generar electricidad mediante ciclos de vapor o binarios, y sistemas de baja y muy baja entalpía, cuyo aprovechamiento se orienta a usos directos o asistidos por bombas de calor. A continuación, la *Tabla 2.1* [11] detalla esta clasificación estándar aceptada internacionalmente, vinculando los rangos de temperatura con sus usos característicos:

Tabla 2.1 Clasificación de Recursos geotérmicos. Fuente “Manual de geotermia, IGME” [11].

Recursos geotérmicos		Temperaturas	Usos
Convencionales	muy baja entalpia	5 - 25 °C	Climatización con bomba de calor
	Baja entalpia	25 - 50 °C	Usos directos
		50 - 100 °C	Usos directos
	Media entalpia	100 - 150 °C	Electricidad
	Alta entalpia	> 150 °C	Electricidad
No convencionales	EGS - HDR	> 150 °C	Electricidad
	Supercríticos	> 300 °C	Electricidad e Hidrógeno

2.2 Tecnologías de aprovechamiento de los recursos geotérmicos

El primer paso para utilizar la energía en forma de calor disponible es instalar en el terreno a aprovechar, un sistema de captación y una bomba de calor que es necesaria al momento de explotar recursos de baja temperatura.

2.2.1 Bomba de calor geotérmica

“Una bomba de calor geotérmica es una máquina que transfiere calor desde una fuente de menor temperatura a una fuente receptora de más temperatura, en donde una de estas fuentes es el suelo” [12]

Todas las bombas de calor cuentan con los mismos 4 componentes, que se muestran en la *Figura 2.1* [13]:

1. **Evaporador:** Actúa como un primer intercambiador de calor evaporando y aumentando el volumen del refrigerante. Absorbe el calor de la fuente y lo ingresa al circuito del fluido refrigerante.
2. **Compresor:** El líquido previamente evaporado ahora se comprime aumentando su temperatura hasta unos 70°C, lo que constituye la fase de mayor consumo energético de la bomba de calor.

3. **Condensador:** El gas a alta presión de la etapa anterior entra al condensador. Una vez ahí, transfiere su energía al agua de calefacción a través de un segundo intercambiador de calor y se condensa, pasando nuevamente a estado líquido
4. **Válvula de expansión:** Disminuye la temperatura y presión del refrigerante, devolviendo el fluido a su estado inicial a través de la válvula de expansión, la que enfría el fluido para poder volver a absorber el calor de la fuente, cerrando el ciclo.

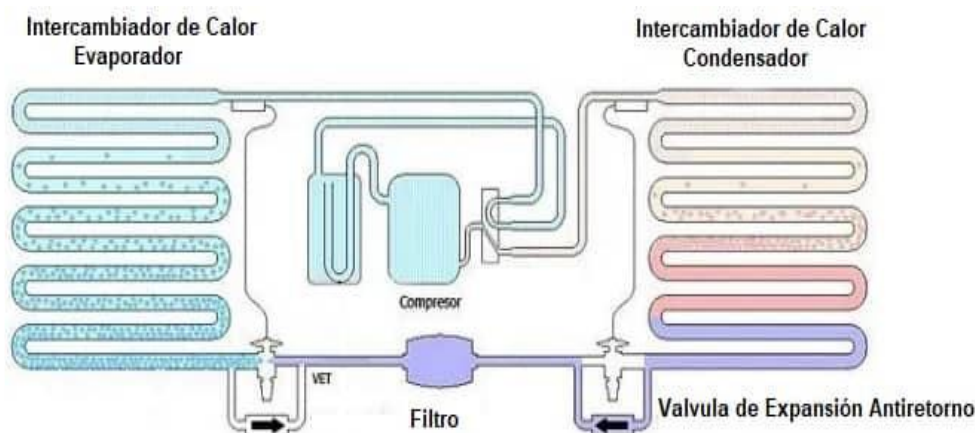


Figura 2.1: Funcionamiento básico de una bomba de calor [14].

2.2.2 Sistemas de captación geotérmica de muy baja entalpía:

Los sistemas de captación geotérmica aprovechan la energía térmica almacenada en el subsuelo para aplicaciones de climatización como calefacción, refrigeración, generación de agua caliente sanitaria y calefacción de superficies exteriores utilizando una fuente de calor gratuita y estable, lo que permite reducir el consumo energético y las emisiones de CO₂ [15].

Esta transferencia de calor puede funcionar tanto para entregar calor al sistema como para quitárselo, es decir, para calentar (quitar energía a la tierra y la ingresarla al lugar) o enfriar (quitar energía del lugar y la entregarla a la tierra) un ambiente.

La primera diferenciación posible es la de sistemas cerrados y abiertos. Luego existen otros tipos de configuración dependiendo del tipo de sistema:

1- Sistemas de Circuito Cerrado

En estos sistemas, un fluido caloportador circula por una red de tuberías enterradas sin contacto directo con el terreno, lo que evita la contaminación del fluido y permite un control más preciso del intercambio térmico. Se distinguen varias configuraciones.

Captación Vertical (Sondas Geotérmicas): Se realizan perforaciones profundas (generalmente entre 50 y 150 m) en las que se instalan tubos sellados con mortero o se rellenan con materiales como bentonita para garantizar la transmisión de calor y aislar el sondeo de posibles circulaciones no deseadas. Las tuberías se instalan formando pares en “U” (doble U), lo que permite conectar las sondas al circuito primario de la bomba de calor, es la forma más utilizada al ser simple de instalar y de bajo costo. Estos tubos están unidos en sus extremos por un codo a 180° y conectados al inicio a la red principal de flujo como se muestra en la *Figura 2.2*.



Figura 2.2: Sondas geotérmicas, captaciones verticales cerradas [16].

Esta solución es ideal cuando el espacio en superficie es limitado, y aunque implica un mayor coste por la perforación y la maquinaria especializada, ofrece un rendimiento térmico superior debido a la estabilidad de la temperatura a profundidades superiores a 15 m [17].

Sondas coaxiales: Es otro tipo de configuración vertical y son adecuadas para perforaciones profundas, debido a su construcción, como se muestra en la *Figura 2.3*, su principal ventaja es su baja resistencia térmica y además son un 15% más eficientes que los tubos en “U” a más de 100 metros de profundidad [18] pero como inconveniente son costosas y difíciles de instalar.



Figura 2.3: Sonda coaxial. Fuente [19].

Sondas en pilotes estructurales: Una aplicación que se asemeja a la instalación de los captadores verticales es la cimentación geotérmica, esto consiste en convertir la estructura de cimentación de un edificio en un conjunto de sondas geotérmicas como se muestra en la *Figura 2.4*.

También llamados pilotes termo-activos son Integrados en los pilotes de cimentación de edificios, combinando función geotérmica y estructural, aunque tiene la desventaja de que en caso de daños y/o filtraciones en las tuberías resultará imposible algún tipo de reparación o reemplazo de las tuberías.

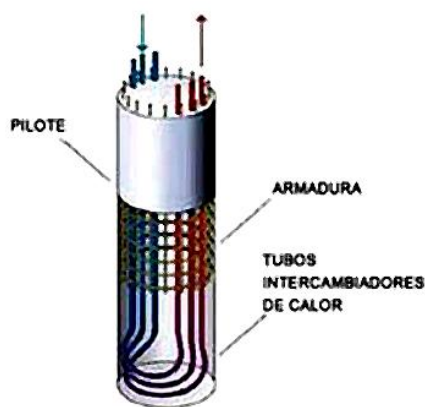


Figura 2.4: Sondas en pilotes estructurales [20].

Captación Horizontal: Se instalan tuberías a baja profundidad (alrededor de 1,2 a 2 m) en forma de serpentin como en la *Figura 2.5* o en disposición espiral ("slinky"). Aunque esta configuración requiere una gran superficie de terreno lo que puede limitar su uso en zonas urbanas o en edificaciones con restricciones en el subsuelo, su coste de

instalación es menor [21]. La variante en espiral permite aumentar la longitud de la tubería en un área reducida, mejorando el intercambio de calor cuando la superficie es limitada.

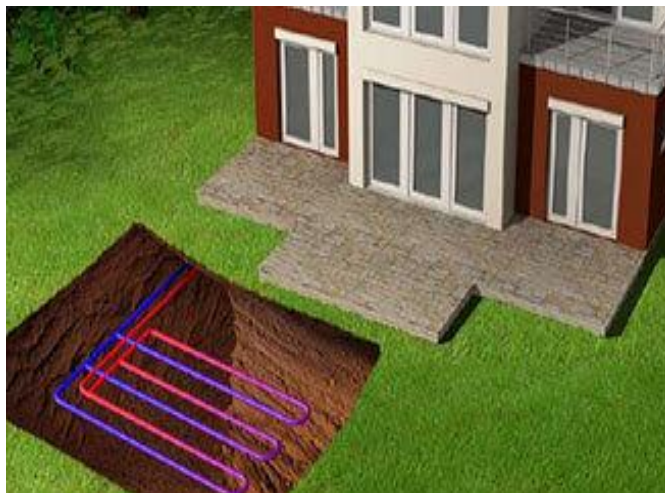


Figura 2.5: Configuración tipo serpiente [18]

2- Sistemas de Circuito Abierto

También llamados sistemas de bucle abierto, estos aprovechan directamente el agua subterránea como medio de intercambio térmico, es decir, se utiliza como fluido caloportador la misma agua proporcionada por el subsuelo.

Con Reinyección: Se extrae agua de un pozo, luego de recorrer todo el circuito, el fluido se reinyecta al subsuelo a través de otro pozo como se muestra en la *Figura 2.6*. Este método ayuda a mantener el equilibrio hídrico y reduce el impacto ambiental, siendo adecuado en áreas con abundantes recursos hídricos y control de calidad del agua [22].



Figura 2.6: Sistema abierto con Reinyección [23].

Sin Reinyección: El agua extraída se descarga en un cuerpo de agua superficial, lo cual requiere un riguroso control para evitar impactos ambientales, garantizando que la calidad del agua vertida cumpla con las normativas vigentes.

El dimensionamiento de estos sistemas se basa en un análisis detallado de la conductividad térmica y la capacidad de almacenamiento de calor del subsuelo, así como en la demanda energética de la edificación. Un aspecto fundamental es el diseño de la red de tuberías, cuya correcta selección y distribución aseguran la eficiencia del intercambio térmico. Estos sistemas también pueden clasificarse según la dirección del fluido como en serie y en paralelo.

2.3 Estado actual de la geotermia en el mundo

El futuro del consumo mundial de energía radica en la producción y el uso de energías limpias. Los datos del informe “ThinkGeoEnergy” [24] indicaron que la producción de energía geotérmica no ha dejado de aumentar a través de los años y alcanzó una capacidad de 16.873 MW a fines del 2024, como se puede ver en la [Figura 2.7](#). Este tipo de energía renovable destaca por su estabilidad y carácter gestionable, lo que la posiciona como una fuente confiable en comparación con otras tecnologías renovables intermitentes como la solar y la eólica.

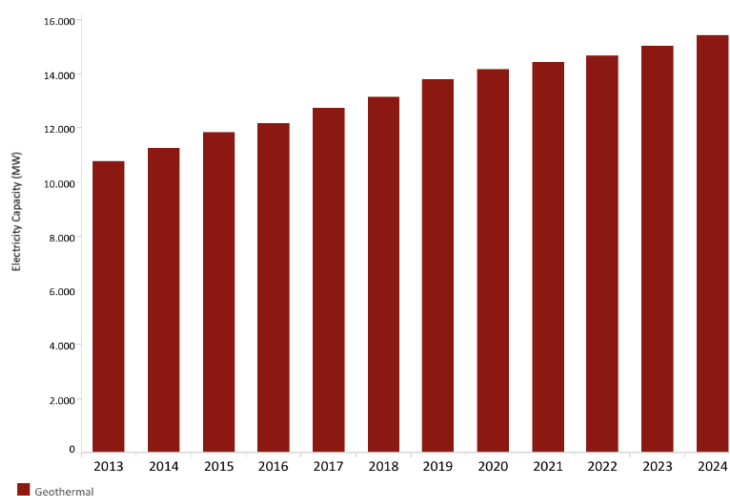


Figura 2.7: Máxima capacidad de generación de energía a través de energía geotérmica a nivel mundial [25].

A día de hoy son entre 30 y 35 los países en el mundo que hacen uso de este tipo de energía para generar electricidad, sin embargo, del total producido a nivel mundial alrededor de un 93% pertenecen a los principales 10 países productores de energía geotérmica [26] [24].

En el caso del uso directo de la energía geotérmica, y como muestra la *Tabla 2.2*, la información más actualizada al respecto, proporcionada por IGA (International Geothermal Association) [27] indica que en total hay 88 países que cuentan con capacidad de aprovechamiento geotérmico instalado para aclimatación de espacios. Siendo un total de 173.303,212 $[MW_t]$ (*Megavattios térmicos*) lo que lleva a una producción total anual de 1.476.312,020 $\left[\frac{TJ}{y}\right]$. Siendo China, el país que resalta con gran diferencia como el que tiene mayor capacidad instalada y mayor producción anual de energía geotérmica para usos directos.

Tabla 2.2: Datos de uso global de energía geotérmica de aprovechamiento directo para climatización de espacios [27].

CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN GEOTÉRMICA			
En 88 países			
Total instalado $[MW_t]$		Producción Total $[TJ/y]$	
173.303,212		1.476.312,020	
Top 5 Instalados $[MW_t]$		Top 5 en Producción $[TJ/y]$	
China	100.219,800	China	828.882,000
USA	20.712,540	USA	152.809,500
Suecia	7.280,000	Turquía	85.000,000
Alemania	5.381,300	Suecia	67.680,000
Turquía	5.113,350	Islandia	35.615,000

Las aplicaciones más comunes de uso directo incluyen la calefacción de espacios (en viviendas, edificios e invernaderos), el calentamiento de aguas sanitarias, la acuicultura, el procesamiento de alimentos y el aprovechamiento en centros termales o balnearios, debido a la eficiencia del recurso térmico y su disponibilidad constante durante todo el año.

Como se resume en la *Tabla 2.2*, China destaca ampliamente como el país con mayor capacidad instalada y mayor producción anual para usos directos, con 100.219,800 $[MW_t]$ y 828.882 $\left[\frac{TJ}{y}\right]$, respectivamente. En un segundo nivel se ubica Estados Unidos, con 20.712,540 $[MW_t]$ y 152.809,500 $\left[\frac{TJ}{y}\right]$. En el grupo siguiente aparecen países europeos una mayor instalación de bombas de calor y calefacción distrital asistida por geotermia, como Suecia y Alemania en capacidad instalada, mientras que Turquía e Islandia resaltan por su alta producción anual asociada al uso intensivo del recurso térmico en calefacción y redes. En conjunto, el ordenamiento por capacidad instalada y por producción anual muestra que no siempre los países con mayor $[MW_t]$ son los mismos que lideran en $\left[\frac{TJ}{y}\right]$, lo que sugiere

diferencias en factores como horas de operación, demanda térmica estacional, cobertura de redes y tipo de aplicaciones predominantes

2.4 Estado actual de la geotermia en Chile

La explotación geotérmica en Chile tiene sus raíces en el siglo XIX, cuando se valoraban las fuentes termales por sus propiedades curativas, se iniciaron exploraciones científicas lideradas por instituciones estatales y colaboradores internacionales [28]. Durante el siglo XX, el interés se centró en la generación eléctrica, aunque enfrentó desafíos técnicos y económicos. En la década de 2010, la Ley 19.657 sobre concesiones geotérmicas y el apoyo estatal revitalizaron el sector, sentando las bases para proyectos modernos.

En Chile, se han visto varios hitos con respecto a la explotación geotérmica desarrollando tanto el primer proyecto a gran escala de Sudamérica con la planta geotérmica Cerro Pabellón como siendo uno de los pioneros a nivel mundial en el campo de geiseros del Tatio [28], marcando un hito histórico y tecnológico en la geotermia sudamericana. Este proyecto fue desarrollado sobre una concesión otorgada el año 2009 y fue finalizado el año 2017 como la primera planta geotérmica de generación eléctrica a escala comercial en Sudamérica y la más alta del mundo en su tipo [29].

A diferencia del desarrollo eléctrico de alta entalpía, que se encuentra geográficamente limitado a zonas volcánicas activas en la Cordillera de los Andes, el aprovechamiento de la geotermia de muy baja entalpía presenta una distribución transversal y creciente a lo largo de todo el territorio nacional. Según los registros más recientes de la base de datos de la Asociación Internacional de Geotermia (IGA) [27], la capacidad instalada total para usos directos en Chile asciende a 23,38 [MW_t].

Históricamente, el uso predominante ha estado vinculado al turismo y la salud, aprovechando las surgencias termales naturales. Este sector representa aún la mayor porción de la capacidad instalada con 14,71 [MW_t]. Sin embargo, es un uso pasivo y no refleja el potencial de implementación tecnológica moderna.

El segmento de mayor relevancia técnica para este estudio es el de climatización de espacios, que ya alcanza los 5,98 [MW_t]. Este valor corresponde casi en su totalidad a la

instalación de Bombas de Calor Geotérmicas (BCG) en circuitos cerrados (verticales y horizontales) o abiertos. Este mercado ha crecido impulsado por la necesidad de eficiencia energética en edificaciones públicas y privadas, validando la tecnología de "muy baja entalpía" como una alternativa competitiva frente a combustibles fósiles y biomasa.

El sector agrícola registra una potencia de 1,45 [MW_t], asociada principalmente al calentamiento de invernaderos y procesos de secado, permitiendo la producción de cultivos fuera de estación en zonas climáticas frías del sur de Chile.

La cifra de ~ 6 [MW_t] en calefacción se sustenta en una serie de proyectos emblemáticos que han servido como validadores tecnológicos en distintas zonas climáticas (Detalle de proyectos de muy baja entalpía en ANEXOS A):

Gracias a iniciativas estatales y al apoyo del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), se han ejecutado proyectos de alto impacto social, como la climatización del Liceo Altos del Mackay (Coyhaique) y la Escuela Luis Cruz Martínez (Curacautín). Estos proyectos utilizan sondas geotérmicas verticales para reemplazar calderas a leña, logrando una reducción drástica de la contaminación intradomiciliaria y atmosférica.

En el sector inmobiliario privado, edificios icónicos como la Torre Titanium La Portada en Santiago y el Edificio Transoceánica han implementado sistemas de intercambio térmico con acuíferos (sistemas abiertos) para satisfacer demandas simultáneas de frío y calor, demostrando la viabilidad económica de la geotermia somera en entornos urbanos densos.

Hospitales como el de Maipú y La Florida han integrado esta tecnología para asegurar un suministro térmico continuo y resiliente, aprovechando la estabilidad térmica del subsuelo para reducir sus costos operativos a largo plazo.

2.4.1 Normativa Chilena en geotermia

Ley N°19.657 sobre Concesiones de Energía Geotérmica (2000) [30]: Promulgada el 7 de enero de 2000, esta ley establece que la energía geotérmica es un bien del Estado susceptible de ser explorado y explotado mediante concesiones. Define las reglas para el otorgamiento de

concesiones de exploración y explotación, incluyendo aspectos técnicos y legales relacionados con la gestión de recursos geotérmicos

Decreto N°205 del Ministerio de Minería (2000) [31]: Este decreto complementa la Ley N°19.657, detallando procedimientos y requisitos para la solicitud y administración de concesiones geotérmicas, así como las obligaciones de los concesionarios en términos de seguridad y protección ambiental.

Decreto N°32 del Ministerio de Minería (2004) [32]: Este decreto derogado actualmente actualiza aspectos técnicos y administrativos relacionados con las concesiones de energía geotérmica, ajustando el marco regulatorio a las necesidades emergentes del sector y promoviendo prácticas seguras y eficientes en la exploración y explotación de recursos geotérmicos.

Decreto N°114 del Ministerio de Energía (2013) [33]: Este decreto establece reglamentos complementarios a la Ley N°19.657, abordando aspectos técnicos y de seguridad en las operaciones geotérmicas, y asignando responsabilidades específicas a las entidades fiscalizadoras.

Ley N°21.711 que Modifica la Ley N°19.657 para el Desarrollo de Proyectos de Aprovechamiento Somero (2024) [34]: Promulgada el 2 de diciembre de 2024, esta ley indica una serie de modificaciones a la ley N°19.657, lo que simplifica las exigencias para ejecutar proyectos geotérmicos de uso directo que obtienen el recurso a menos de 400 metros de profundidad y con temperaturas inferiores a 90°C. Estos proyectos quedan eximidos del sistema concesional, adoptando un régimen registral simplificado. Además, la ley actualiza las condiciones de fiscalización, asignando a la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) la responsabilidad de supervisar la seguridad de las faenas geotérmicas, modernizando y fortaleciendo el marco regulatorio del sector.

Modificaciones que eran necesarias ya que la ley N°19.657 vigente hasta ese entonces tenía problemas regulatorios derivados del marco legal vigente, dejando barreras legislativas las cuales dificultaban o impedían el desarrollo de proyectos de geotermia somera y de baja entalpía en Chile.

2.4.2 Barreras normativas en la explotación de la energía geotérmica en Chile

Durante años, el marco normativo estuvo determinado exclusivamente por la Ley N°19.657, promulgada en el año 2000, cuyo diseño respondía principalmente a los requerimientos de proyectos de generación eléctrica en alta entalpía, sin considerar adecuadamente las particularidades de otros tipos de aprovechamiento térmico existentes.

Como menciona CEGA [35] una falta de diferenciación legal entre geotermia profunda y geotermia somera, junto con la rigidez del proceso concesional y la ausencia de incentivos normativos para el uso directo del calor terrestre, generaron un entorno restrictivo para la implementación de tecnologías de climatización geotérmica a pequeña escala, especialmente en edificaciones urbanas, viviendas e instalaciones de uso comunitario.

Con la promulgación de la Ley N°21.711 en 2024, se introducen modificaciones sustantivas orientadas a corregir parte de estas deficiencias. La nueva normativa reconoce por primera vez el concepto de aprovechamiento somero de la energía geotérmica y exime a este tipo de proyectos del régimen de concesiones, estableciendo un marco más expedito y proporcional a su escala de impacto.

Aunque la nueva Ley facilita la inscripción de los proyectos, en la práctica, cualquier instalación que interactúe con el agua subterránea debe seguir cumpliendo con normativas técnicas. Para ejecutar cada proyecto con mayor facilidad, existen guías que cubren desde los permisos legales hasta el diseño práctico:

1. **Guía para Solicitudes de Derechos en Uso Directo (DGA) [36]:** Este manual explica paso a paso cómo pedir los permisos de agua para fines térmicos. Es fundamental para diseñar correctamente las pruebas de bombeo y los pozos de reinyección, asegurando que el sistema sea sostenible y no afecte el acuífero.
2. **Manual de Normas y Procedimientos de la DGA [37]:** Es el reglamento administrativo que rige todas las obras hidráulicas en Chile. Aunque es más denso, define las reglas del juego para obtener las autorizaciones de exploración y explotación de aguas.

3. **Guía práctica uso de geotermia somera para climatización (CEGA) [38]:** Publicada en 2022, esta guía complementa la normativa legal con un enfoque ingenieril. Entrega herramientas prácticas para el dimensionamiento de bombas de calor, cálculo de costos y soluciones de instalación, sistematizando la experiencia de proyectos piloto chilenos de baja entalpía.
4. **Guía para el Desarrollo de Proyectos de Plantas de Energía Geotérmica (Ministerio de Energía) [39]:** Este documento es clave para entender el ciclo de vida integral de un proyecto geotérmico. Aunque abarca instalaciones de mayor envergadura, proporciona el marco metodológico para las etapas de prefactibilidad, evaluación ambiental y relacionamiento comunitario, aspectos transversales necesarios para validar la viabilidad de cualquier desarrollo geotérmico en la región, especialmente en la zona andina.

3 Antecedentes de la zona de estudio

3.1.1 Ubicación de la región [40]:

La zona de estudio abarca la totalidad de la Región del Biobío, situada en la zona centro-sur de Chile continental, extendiéndose geográficamente entre los paralelos 36°00' y 38°30' de latitud Sur y los meridianos 71°00' y 74°00' de longitud Oeste.

Administrativamente, la región se estructura en tres provincias: Concepción (zona costera e industrial), Biobío (depresión intermedia y Cordillera) y Arauco (borde costero sur y Cordillera de Nahuelbuta), con la ciudad de Concepción como capital regional.

Territorialmente, limita al Norte con la Región de Ñuble, al Sur con la Región de la Araucanía, al Este con la República Argentina y al Oeste con el Océano Pacífico. La región posee una superficie aproximada de 24.000 [km²] y concentra una población superior a los 17 millones de habitantes. Esta densidad demográfica, sumada a su perfil como polo industrial y forestal, genera una demanda energética significativa y constante, lo que convierte al Biobío en un escenario estratégico para la evaluación de nuevos recursos renovables como la geotermia.

3.1.2 Clima:

La Región del Biobío se sitúa en una zona de transición climática entre los climas templados de tipo mediterráneo propios de la zona central de Chile y los climas templados lluviosos del sur [41]. Esta condición genera una marcada variabilidad estacional y espacial, descrita a continuación según la división geográfica de la región:

Provincia de Concepción (Zona Costera y Valle Inferior): En esta zona predomina un clima templado cálido con influencia oceánica. La cercanía al Océano Pacífico actúa como un regulador térmico, moderando las oscilaciones de temperatura diarias y estacionales. Los veranos son suaves y los inviernos húmedos, con una alta humedad relativa constante, lo que implica una demanda de calefacción moderada pero continua para control higrotérmico.

Provincia de Arauco (Costa Sur y Cordillera de Nahuelbuta): Presenta condiciones de mayor humedad, clasificándose mayoritariamente como clima templado lluvioso con influencia costera. La presencia de la Cordillera de Nahuelbuta actúa como una barrera orográfica que atrapa los frentes provenientes del océano, generando precipitaciones significativamente mayores que en el resto de la región, superando los 1.200 mm anuales en ciertos sectores.

Provincia de Biobío (Depresión Intermedia y Cordillera de los Andes): Esta zona exhibe las condiciones más extremas y continentales:

- **En la Depresión Intermedia (Los Ángeles):** Se observa un clima templado cálido con estación seca prolongada, caracterizado por una alta oscilación térmica diaria y estacional. Los veranos son calurosos y secos, mientras que los inviernos son fríos con heladas frecuentes, exigiendo sistemas de calefacción de mayor potencia.
- **En la Zona Andina (Alto Biobío, Antuco):** A medida que aumenta la altitud (sobre los 1.500 m.s.n.m.), el clima cambia a frío de altura y, en las cumbres volcánicas, a condiciones de tundra o hielo por efecto de altura. Aquí, las precipitaciones superan los 2.000 mm anuales, mayoritariamente en forma de nieve, constituyendo el escenario para el aprovechamiento geotérmico de alta entalpía.

3.1.3 Características del suelo:

Los suelos de la Región del Biobío [42] presentan una marcada variabilidad génica morfológica, determinada por la interacción entre el material parental (roca madre o cenizas volcánicas) y los agentes climáticos. Se pueden distinguir tres grandes asociaciones de suelos distribuidas longitudinalmente:

Cordillera de la Costa y Litoral (Provincia de Arauco y Concepción): En esta zona predominan los suelos de origen metamórfico y granítico. Se caracterizan por ser suelos arcillosos de color pardo-rojizo (pertenecientes a los órdenes Ultisoles y Alfisoles), desarrollados sobre rocas antiguas de la Cordillera de la Costa. Generalmente presentan una profundidad moderada y texturas finas que favorecen la retención de humedad, pero pueden presentar problemas de drenaje en zonas planas.

Depresión Intermedia (Provincia de Biobío - Los Ángeles): El llano central está constituido mayoritariamente por suelos de origen aluvial y fluvioglacial, formados por el relleno sedimentario de los ríos (como el Biobío y el Laja) y arenas volcánicas. Destacan los suelos arenosos (arenales del Laja) y los suelos trumaos (derivados de cenizas volcánicas), los cuales poseen una alta porosidad y permeabilidad. Estas características físicas son críticas para la geotermia somera, ya que influyen directamente en la difusividad térmica y la facilidad de excavación.

Precordillera y Cordillera de los Andes: En el sector oriental, los suelos son volcánicos recientes (Andisoles). Corresponden a depósitos de cenizas, escorias y lavas de los centros eruptivos activos (Antuco, Callaqui). Son suelos de textura media a gruesa, con alta capacidad de retención de agua y materia orgánica en superficie, pero de espesor variable debido a la topografía accidentada.

3.1.4 Características geológicas:

La geología de la mayor parte del país, está controlada por la subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana, lo que ha dado origen a cuatro unidades morfoestructurales

longitudinales con características litológicas bien diferenciadas [43]. Estas unidades definen no solo la estratigrafía, sino también el tipo de explotación geotérmica viable en cada zona:

Planicies Litorales y Cuenca de Arauco: En la franja costera predominan las secuencias sedimentarias marinas y continentales del Cretácico Superior y el Terciario. Destacan formaciones como Quiriquina y el Grupo Lebu (que incluye la Formación Curanilahue, famosa por sus mantos de carbón). Estas rocas sedimentarias (areniscas, lutitas y conglomerados) poseen una porosidad y permeabilidad primaria que, sumada a la recarga hídrica superficial, favorece la existencia de acuíferos someros aptos para el aprovechamiento geotérmico de baja entalpía mediante sistemas abiertos o cerrados.

Cordillera de la Costa (Batolito Costero y Metamórfico): Esta unidad está constituida principalmente por un Basamento Metamórfico (Series Orientales), compuesto por esquistos y pizarras de edad Paleozoica, intruidas por grandes cuerpos de rocas ígneas conocidas como el Batolito de la Costa (granitos y granodioritas del Carbonífero-Pérmico). En la Cordillera de Nahuelbuta, estas rocas graníticas afloran en superficie. Desde el punto de vista térmico, estos macizos rocosos cristalinos presentan una conductividad térmica más alta que los sedimentos, siendo favorables para la instalación de sondas geotérmicas verticales (sistemas sHE) debido a su estabilidad y capacidad de transferencia de calor por conducción.

Depresión Intermedia (Valle Central): Estructuralmente corresponde a un graben o fosa tectónica rellena por una potente secuencia de depósitos sedimentarios no consolidados de edad Cuaternaria. Estos rellenos son de origen fluvio-glacial y volcánico (lahares, arenas basálticas y cenizas) provenientes de la erosión y actividad de la Cordillera de los Andes. El gran espesor de estos sedimentos (que en sectores como Los Ángeles puede superar los cientos de metros) alberga los principales acuíferos de la región, ofreciendo condiciones óptimas para bombas de calor agua-agua debido a la facilidad de perforación y la alta transmisividad hidráulica.

Cordillera de los Andes (Arco Volcánico): El sector oriental está dominado por el volcanismo activo del Cuaternario y secuencias volcano-sedimentarias más antiguas (como la Formación Cura-Mallín del Mioceno). La presencia de centros eruptivos indica la existencia de cámaras magmáticas activas que actúan como fuente de calor para sistemas hidrotermales de

alta entalpía. Esta es la única zona de la región con potencial para la generación eléctrica convencional.

Limitada al Este por la frontera con Argentina; su tramo andino corresponde al segmento centro-sur de la Cordillera de los Andes, perteneciendo a la Zona Volcánica del Sur del país (SVZ) y comprende relieves que superan los 3.000 m.s.n.m. (Sierra Velluda 3.585 m, Volcán Callaqui 3.164 m, Volcán Antuco 2.979 m, Volcán Copahue 2.997 m y Volcán Tolhuaca 2.806 m).

3.1.5 Hidrogeología:

El comportamiento hidrogeológico de la Región del Biobío está determinado por la capacidad de almacenamiento y transmisión de agua de las unidades geológicas. Se han identificado y delimitado 4 principales unidades hidrogeológicas con nombre propio que definen el potencial de explotación [44]:

Sistemas del Valle y Río Biobío: En la depresión intermedia y el curso del río, destaca el *Acuífero Aluvial del Río Biobío*, una unidad de gran extensión (aprox. 235 km²) constituida por gravas, arenas y limos de alta permeabilidad. Este acuífero conecta con una unidad más profunda y antigua denominada *Acuífero Triásico Quilacoya-Santa Juana*, formado por secuencias sedimentarias (conglomerados y areniscas) encajadas en el basamento granítico.

Sistemas Costeros (Provincia de Concepción y Arauco): En la zona litoral, la DGA define dos unidades principales. *Acuífero San Pedro de la Paz-Talcahuano*, con una superficie de 258 km², corresponde a rellenos sedimentarios marinos y continentales (arenas y areniscas) que cubren la península y la desembocadura. Es un acuífero sensible a la intrusión salina. *Acuífero Costero de Lebu*, ubicado en la provincia de Arauco, abarca unos 1.165 km². Es un sistema multicapa complejo donde alternan niveles permeables de areniscas y gravas con niveles confinantes, alcanzando profundidades de basamento de hasta 900 metros en algunos sectores.

Dominio de Roca Fracturada (Basamento): Fuera de las unidades acuíferas mencionadas, el informe clasifica el resto del territorio (Cordillera de la Costa y Andes) como "Otros Acuíferos" o unidades de basamento. Estas corresponden a macizos de granito y rocas

metamórficas donde el agua circula exclusivamente por fracturas secundarias, presentando permeabilidades bajas a muy bajas.

3.1.6 Exigencias térmicas de calefacción y enfriamiento para la región del Biobío

Para contextualizar la demanda energética, se han analizado los requerimientos establecidos en los “*Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas de Chile*” [45], los que están tabulados en la *Tabla 3.1*. Este documento define una zonificación climática, clasificando por zonas todo el país desde la A, hasta la I y las exigencias de desempeño para proyectos residenciales en la región.

En la Región del Biobío se identifican tres macrozonas predominantes:

- **Zona E (Litoral y Valle Costero):** Abarca la totalidad de las provincias de Concepción y Arauco. Se caracteriza por una influencia oceánica que modera las oscilaciones térmicas.
- **Zona F (Depresión Intermedia):** Comprende la mayor parte de la Provincia de Biobío (comunas como Los Ángeles, Mulchén, Nacimiento) y el valle central de Ñuble. Esta zona presenta un clima de transición con mayores amplitudes térmicas, generando demandas significativas tanto en invierno como en verano.
- **Zona H (Precordillera Andina):** Corresponde a las comunas cordilleranas de la Provincia de Biobío (Alto Biobío, Antuco, Santa Bárbara, Tucapel, Quilleco). Es la zona con condiciones invernales más severas y altas exigencias de calefacción

Tabla 3.1: Demanda máxima de calefacción y enfriamiento para la región del Biobío $\left[\frac{kWh}{m^2}\right]$ [45].

Zona térmica	Linea base (2020) $\left[\frac{kWh}{m^2}\right]$		Meta a 2030 $\left[\frac{kWh}{m^2}\right]$		Meta a 2050 $\left[\frac{kWh}{m^2}\right]$	
	Calefacción	Enfriamiento	Calefacción	Enfriamiento	Calefacción	Enfriamiento
Zona E (Litoral)	117	5	88	5	30	0
Zona F (Intermedia)	135	5	100	5	30	0
Zona H (Andina)	120	0	90	0	30	0

4 MARCO TEÓRICO

4.1 Conceptos generales

Existen 2 propiedades que son clave para evaluar el potencial geotérmico ya que son conceptos fundamentales en el estudio de la transferencia de calor [46]. Estos términos relacionan cómo se comportan los materiales al ser sometidos a cambios de temperatura, pero cada uno tiene aplicaciones específicas, estos conceptos son:

Conductividad térmica (k o κ): La conductividad térmica se refiere a la capacidad de un material para conducir el calor que se mide en $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$ [47], es decir, la capacidad de un material para permitir o restringir el paso del calor a través de él producto de una diferencia de temperaturas. Esta capacidad se ve influenciada por la estructura molecular y composición química del material, por lo general, es muy elevada en los metales y en los cuerpos continuos, y muy baja en los polímeros y otros materiales aislantes como la fibra de vidrio [48].

Difusividad térmica (α): relación entre conductividad, densidad y calor específico, que mide la velocidad de propagación del calor en el suelo en $\left[\frac{m^2}{s}\right]$, es decir, mide que tan rápido se propaga el calor dentro del material cuando se somete a una perturbación térmica [49]. Generalmente se denota por α y su expresión viene dada por:

$$\alpha = \frac{\text{Calor conducido}}{\text{Calor almacenado}} = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad (1)$$

Donde:

- K: Conductividad térmica en $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$
- ρ : Densidad del material en $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
- c_p : Calor específico en $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$

Estas propiedades al ser intrínsecas del material se ven muy afectadas con cambios en la composición de este y para efectos de este estudio, se debe prestar especial atención al suelo,

específicamente en cómo está clasificado según sus características edafológicas. También como se ven afectadas por factores climáticos como la temperatura y la humedad del suelo que tiene directa relación con la dimensión temporal refiriéndose a las estaciones del año y los meses del año que abarcan estas.

Conductancia térmica (C) [50]: La conductancia térmica es una propiedad que describe la capacidad de un cuerpo para transmitir calor a través de el mismo cuando existe una diferencia de temperatura entre sus extremos, medido en $\left[\frac{W}{^{\circ}C}\right]$. Se calcula como la conductividad térmica del material (K) por el área de la superficie (A) dividida por el espesor de la capa (d) que se está estudiando, o bien, como el inverso de la resistencia térmica (R).

$$G = \frac{1}{R} = \frac{K \cdot A}{d} \quad (2)$$

Donde

- K : Conductividad térmica $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$.
- A : Área transversal de la capa $[m^2]$.
- d : Espesor de la capa $[m]$.
- R : Resistencia térmica $\left[\frac{^{\circ}C}{W}\right]$.

4.2 Generación de modelo para el cálculo de potencial geotérmico para captaciones horizontales

La base conceptual del modelo de captación horizontal se sustenta en la *teoría matemática de la conducción de calor*, la cual describe la transferencia de energía térmica en medios sólidos a partir de gradientes de temperatura y propiedades térmicas del material (El desarrollo matemático completo se presenta en *ANEXO C: DESARROLLO MATEMÁTICO DEL MODELO DE CONDUCCIÓN DE CALOR*).

Los resultados de experimentos realizados [51] sobre diferentes sólidos sugieren que, cuando se ha alcanzado el estado estacionario de temperatura, la cantidad de calor “Q” que

fluye hacia arriba a través de una placa plana de espesor “ d ” en “ t ” segundos sobre la superficie “ S ” es igual a:

$$Q = \frac{K \cdot (v_0 - v_1) \cdot S \cdot t}{d} \quad (3)$$

Donde:

- **K**: Constante llamada Conductividad Térmica del material, que depende, en efecto del material del que está hecha. En otras palabras, el flujo de calor entre estas dos superficies es proporcional a la diferencia de temperatura de las superficies.
- v_0 : temperatura de la superficie inferior
- v_1 : temperatura de la superficie superior
- **d**: grosor de la capa

La *Ecuación (3)* representa una forma de la conducción de calor en estado estacionario y bajo una geometría simple, donde el flujo “ Q ” se obtiene a partir de una diferencia de temperatura impuesta a través de un espesor “ d ”.

Sin embargo, para describir el comportamiento térmico alrededor de una tubería se requiere reformular esta ecuación para que describa como se mueve el calor en el tiempo [51]. En ese contexto, después de un riguroso desarrollo matemático, la conducción se expresa mediante una nueva ecuación diferencial y, bajo simetría radial, adoptando una forma cilíndrica mostrada en la *Ecuación (4)*, que describe la evolución de $v(r, t)$ en función de la difusividad α

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} \right) \quad (4)$$

Donde:

- α : Difusividad térmica.
- v : Temperatura.
- r : Radio del cilindro.

- t : Tiempo.

Ahora bien, Intentar hacer un modelo con esta ecuación, presenta grandes desafíos producto de la complejidad matemática que representa y la incertidumbre de los parámetros físicos involucrados. Por lo que, en otro trabajo [52] se modela el intercambio térmico entre el suelo y un fluido moviéndose a través de tuberías, considerando, además de las propiedades térmicas de las tuberías, una nueva variable, la resistencia térmica del suelo.

El proyecto mencionado utiliza el software EUREQA, el cual funciona utilizando algoritmos avanzados para determinar ecuaciones matemáticas que describan un conjunto de datos en su forma más simple. Este tipo de tareas se les conoce como regresión simbólica.

En este caso, el software se utiliza como base la *Ecuación (4)* para encontrar una conductancia del suelo $h(K, \frac{K}{c_v}, R, \Delta t, \Delta T)$ que dependa de una conductividad K en $[\frac{W}{m \cdot K}]$, una difusividad α en $[\frac{m^2}{s}]$, el radio de las tuberías R en $[m]$, el tiempo Δt en días y la temperatura ΔT en $^{\circ}C$.

Luego, el calor transferido entre el suelo y las tuberías sigue un comportamiento lineal con la diferencia de temperatura, por lo que el fenómeno de transferencia de calor puede ser representado a través de la ley de enfriamiento de newton $q = h \cdot \Delta T$ donde “ q ” es el flujo de calor en $[\frac{W}{m^2}]$, “ h ” es la conductancia térmica efectiva del suelo en $[\frac{W}{m^2 \cdot K}]$ y “ ΔT ” es la diferencia de temperatura entre un cuerpo y su entorno $[^{\circ}C]$.

Así, teniendo en cuenta el resultado del estudio y desarrollando una igualdad con la ecuación de newton, se llega a:

$$Q = \frac{6,889 \cdot K \cdot \Delta t^{0,14}}{\alpha^{0,109} \cdot R^{0,696}} \cdot \Delta T \quad (5)$$

Donde:

- Q : Flujo de calor por unidad de superficie $[\frac{W}{m^2}]$.

- ΔT : Diferencia de temperatura entre la cota de las tuberías y la superficie [$^{\circ}\text{C}$].
- R : radio de las tuberías [m].
- Δt : tiempo de uso [s].
- A : Difusividad térmica del terreno $\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right]$.
- K : Conductividad térmica del terreno $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}}\right]$.

Para reducir el modelo y estandarizar los cálculos se usan valores estándar en la construcción de sistemas geotérmicos superficiales para la definición de la geometría de las tuberías y el tiempo de uso del sistema.

- **Radio de las tuberías (R):** Este es un parámetro que es directamente proporcional al calor que entrega el sistema de climatización, pero inversamente proporcional al flujo, es decir, reduce la eficiencia del flujo del calor. A partir de esto, se considerará un valor intermedio dentro del rango de valores típicamente utilizados para estos sistemas, que es 7,5 [cm].
- **Tiempo de uso (t):** La norma VDI 4640 [53] [54] define un tiempo de uso para el cual los valores de las propiedades térmicas del sedimento o roca son válidos, este tiempo se define en 2.400 [h] que equivale a 3 meses.

Finalmente, al aplicar los datos definidos en la *Ecuación (5)* se obtiene una ecuación reducida que solo depende de las variables correspondientes a la ubicación geográfica, generando un modelo para calcular el potencial geotérmico superficial para captaciones horizontales:

$$Q = \frac{0,287 \cdot K}{\alpha^{0,109}} \cdot \Delta T \quad (6)$$

Donde:

- K : Conductividad térmica del material $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}}\right]$.
- α : Difusividad Térmica $\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right]$.
- ΔT : diferencia de temperaturas entre las tuberías y la atmosfera [$^{\circ}\text{C}$].

La elección de este modelo se justifica porque permite estimar el potencial geotérmico incorporando explícitamente las propiedades térmicas del suelo (conductividad y difusividad) y la estacionalidad climática, factores fundamentales en el comportamiento térmico de los primeros metros del subsuelo, donde operan los sistemas horizontales. Además, su formulación es compatible con la información pública disponible para la región, lo que lo hace adecuado para estudios preliminares a escala regional. No obstante, el método presenta limitaciones asociadas a la resolución de la cartografía de suelos y a la variabilidad anual de las temperaturas superficiales, por lo que sus resultados deben interpretarse como aproximaciones referenciales.

4.3 Modelos de cálculo de potencial geotérmico para captaciones verticales

4.3.1 Método sHE (Specific Heat Exchanger) [55]

Es un método simplificado y estandarizado, para evaluar potencial geotérmico de muy baja entalpía en sistemas verticales para instalaciones domésticas con bomba de calor de baja capacidad (hasta 30 kW) bajo ciertas condiciones de construcción.

- Solo extracción de calor
- Profundidad de cada pozo extractor debe estar entre 40 a 100 metros.
- La mínima distancia entre diferentes pozos debe ser de 5 metros para pozos de entre 40 y 50 metros de profundidad y de 6 metros para pozos de entre 50 y 100 metros de profundidad.
- Tuberías de doble-U con diámetro nominal de 20, 25 o 32 según la norma ISO 6708 o tuberías coaxiales con un diámetro mínimo de 60 [mm].

A partir de estos valores y la información geológica y estratigráfica es posible obtener el potencial del recurso geotérmico en un punto específico.

Para esto se multiplica el espesor de la columna de roca por el factor sHE y en caso de existir estratificación de las rocas y/o una separación de sedimentos húmedos o secos producto del nivel subterráneo del agua el sHE se calcula de la siguiente manera:

$$sHE_{prom} = \frac{1}{E_{total}} \sum_{k=1}^n (sHE_k \cdot E_k) \quad (7)$$

Donde:

$$E_{total} = \sum_{k=1}^n E_k \quad (8)$$

- **sHE_{prom}** : specific heat exchanger promedio $\left[\frac{W}{m}\right]$.
- **E_{total}** : Espesor total de estudio [m].
- **sHE_k** : specific heat exchanger de la capa k-ésima $\left[\frac{W}{m}\right]$.
- **E_k** : Espesor de la capa k-ésima [m].

Este método se emplea ampliamente por ser un estándar internacional consolidado, recomendado por la norma VDI 4640, y por entregar valores específicos de captación basados en litología y condiciones de saturación, parámetros que pueden representarse adecuadamente con cartografía geológica publica disponible. Este enfoque resulta especialmente apropiado para estimar el potencial de sistemas verticales cerrados en estudios preliminares, ya que su formulación simplificada permite integrar de manera directa los espesores efectivos dentro de la columna de 100 m. Sus principales limitaciones provienen de la simplificación estratigráfica y de su inaplicabilidad en zonas con anomalías térmicas asociadas a vulcanismo activo, por lo que los resultados deben entenderse como aproximaciones regionales.

Los modelos generados deben interpretarse como línea base a escala regional, con un grado de confiabilidad moderado a nivel regional y bajo a escala local o predial. Esta calificación se explica por tres fuentes principales. La escala cartográfica empleada (SOTERLAC y geología 1:1.000.000), que implica generalización espacial y puede no capturar variaciones locales de litología, textura y humedad del suelo, es necesario interpolar datos (temperaturas mensuales, nivel freático y superficies auxiliares), que suavizan gradientes y pueden desplazar máximos/mínimos reales, especialmente en zonas con microclimas o estratigrafía compleja y la asignación bibliográfica de propiedades térmicas (K y α) y de valores tabulados sHE , representan condiciones promedio y no la variabilidad local. Adicionalmente, los supuestos geométricos y operativos (por ejemplo, 2 m de profundidad en horizontales, 100 m en verticales, $2.400 \left[\frac{h}{año}\right]$ y radio de tubería estandarizado) acotan el comportamiento esperado. En conjunto, los valores son referenciales y útiles para prefactibilidad y priorización de zonas.

5 DESARROLLO METODOLÓGICO

5.1 Estimación del potencial geotérmico para sistemas horizontales

5.1.1 Selección de datos de entrada

Para calcular el potencial geotérmico en captaciones horizontales, fue necesario reunir información de distintas fuentes públicas y llevarla a un formato que se pueda trabajar en ArcGIS. En términos simples, el modelo necesita saber qué tipo de suelo hay en cada zona (porque de eso dependen las propiedades térmicas), cómo cambia la temperatura durante el año (para calcular la diferencia de temperatura entre el subsuelo y el ambiente) y contar con la delimitación de la Región del Biobío para recortar y procesar todo dentro del área de estudio, Siendo las capas base para el modelo y obtenidas a partir de bases de datos públicas son las siguientes:

Mapa Digital de suelos y terreno de Latinoamérica y el Caribe (SOTERLAC por sus siglas en inglés) [56]: La fuente de datos geo-referenciados de suelos de América Latina y el Caribe en una escala de 1:1.000.000. De este mapa, llamado “LAC_SOTER” se utilizó el campo “DOMSOIL_UN” que es el que contiene la información necesaria.

Límites Comunales de la región de Biobío [57]: En este caso, la plataforma facilitó un mapa de cobertura GIS tipo shapefile con los límites comunales de la región. De este mapa se utilizó la capa “COMUNA_C17” que es una capa shapefile tipo polígono que contiene las dimensiones y ubicación georreferenciada de la región del Biobío.

5.1.2 Generación de mapas base

1- Mapa de distribución de grupos de suelos

La información sobre la distribución espacial y georreferenciada de cada grupo de suelos es necesaria para utilizar como la base a partir de la cual, se integrará toda la información al respecto con las propiedades térmicas del material (Las referencias de todas las coberturas GIS utilizadas en este proyecto se pueden encontrar en [*ANEXOS A: Tablas.*](#)).

El mapa base contiene información de toda Sudamérica y el alcance de este estudio se restringe solo a la región del Biobío (Los procedimientos cada método se encuentran en ANEXOS D: ESQUEMAS), así que, se utiliza la herramienta de recorte **Clip** utilizando como entrada el mapa del continente y como máscara, el shapefile de la región. La capa resultante es llamada “Suelos_Biobío_1” y se reconocen 8 clasificaciones de suelos: Alisoles (AL), Andisoles (AN), Fluvisoles (FL), Gleysoles (GL), Nitisoles (NT), Cambisoles (CM), Arenosoles (AR) y Lixisoles (LV), como se puede ver en la *Figura 5.1*.

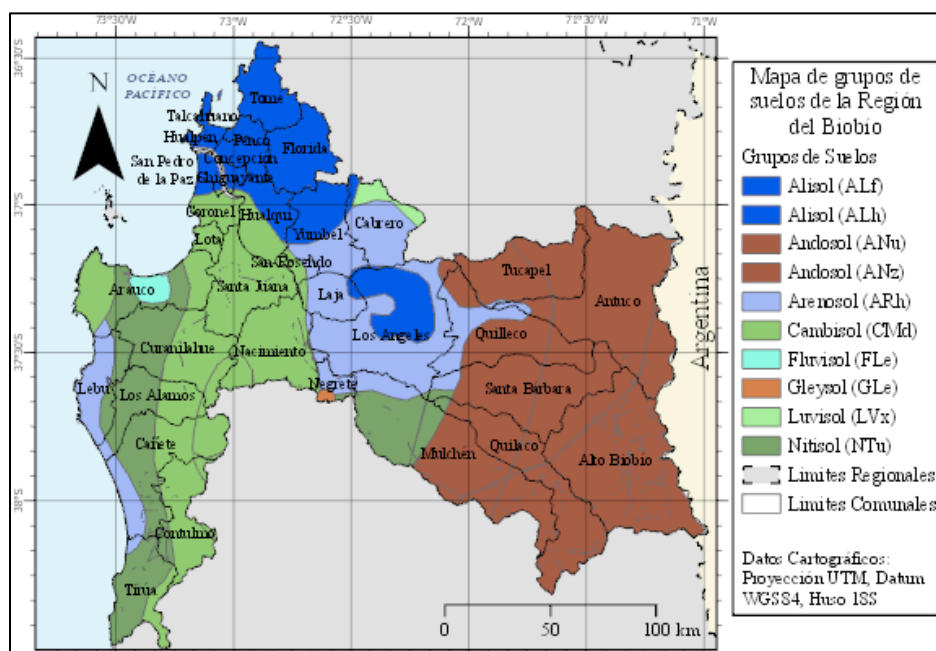


Figura 5.1: Mapa de los suelos que componen la región del Biobío [56].

2- Mapa de distribución de clases texturales de la región del Biobío

Una parte necesaria para asignar los parámetros térmicos requeridos por el modelo, es definir un tipo de textura para cada grupo de suelos, por lo que, a partir del paso lo anterior se realizó un análisis para asignar una clase textural (Arenosa, Arcillosa, Limosa, entre otras) a cada grupo de suelos, donde se tuvo en cuenta el porcentaje aproximado de arena, limo y arcilla que compone cada uno (el detalle sobre las consideraciones que se tuvieron al momento de asignar la información se encuentra en [ANEXOS A: Tablas](#)). Información que luego sería ingresada a ArcGIS creando un nuevo campo en la tabla de atributos de la misma capa generada en el paso anterior “Suelos_Biobío_1”, con lo cual, se genera el mapa que se verá en la *Figura 5.2* a continuación.

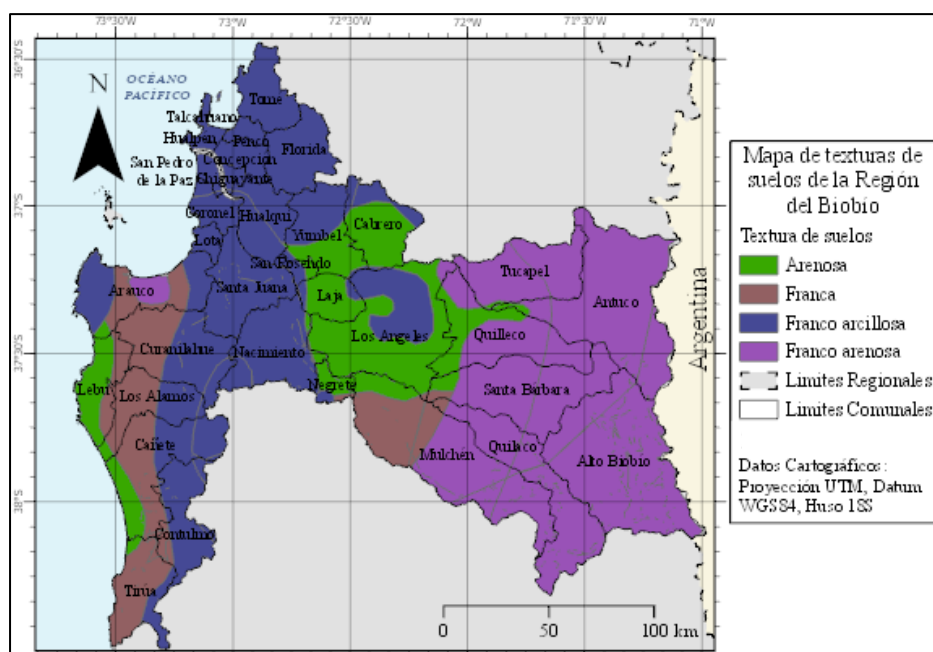


Figura 5.2: Mapa de texturas según grupos de suelos de la región del Biobío.

3- Definición de régimen de humedad de la región del Biobío

La comprensión del comportamiento climático en el transcurso del año es fundamental para manejar las propiedades del suelo, que se ven directamente afectadas por la presencia de agua. La forma de analizar esto es estudiando regímenes de humedad de la región, lo que está determinado por el volumen total de precipitaciones anuales y, especialmente, por la distribución temporal de la lluvia a lo largo de los distintos meses del año. Considerando la información descrita en las bibliografías "Suelos de Chile" [58], "Atlas agroclimático de Chile" [41] y "Taxonomía de Suelos de Chile" [59], se diferencian 3 regímenes de humedad para la región. Generando una gráfica con esta información y que se muestra en la *Figura 5.3*, para la región.

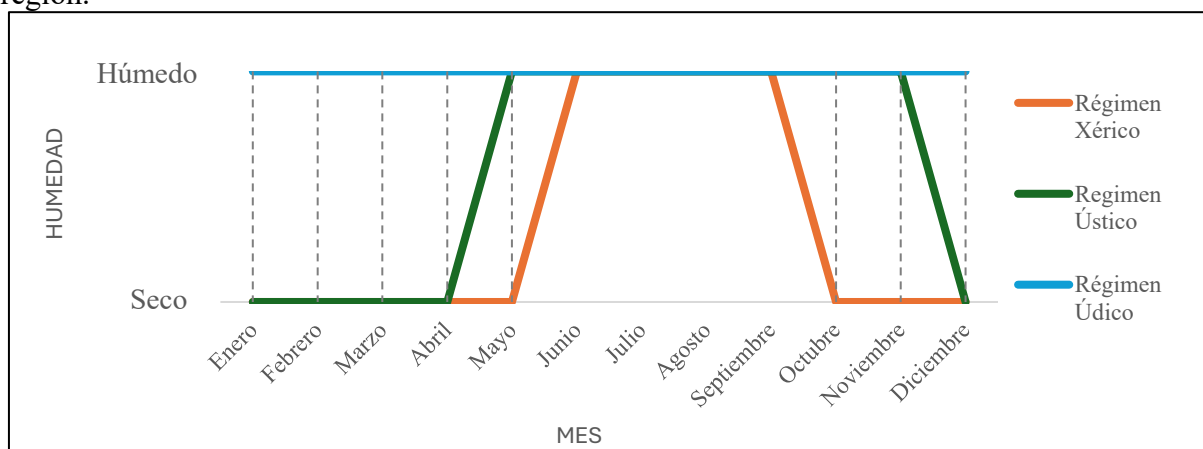


Figura 5.3: Distribución mensual de los regímenes de humedad de la región del Biobío.

Además, se han distribuido y delimitado espacialmente las tres zonas, según su régimen de humedad, las cuales agrupan a las distintas comunas de la región. Datos que una vez ingresados a ArcGIS entrega como resultado la *Figura 5.4* mostrada a continuación.

Régimen Ústico: Presenta una distribución geográfica dividida dentro de la región. Por un lado, cubre el sector de la Precordillera y Cordillera de los Andes, que vienen siendo las comunas de Antuco, una pequeña parte de Alto Biobío, Santa Bárbara, Quilleco, Tucapel y aproximadamente la mitad de Quilaco y una tercera parte Central de Mulchén. Por otro lado, abarca la franja de la Cordillera de la Costa y el litoral Norte.

Régimen Xérico: Se concentra en la Depresión Intermedia. Abarca las comunas del valle central, es decir a Los Ángeles, Cabrero, Yumbel, Laja, San Rosendo, Negrete y alrededor de la tercera parte Oeste de Mulchén.

Régimen Udico: Este régimen de mayor humedad se restringe a los extremos suroeste y sureste de la región, en la Provincia de Arauco sur y en la Cordillera de Los Andes. Al Oeste comprende las comunas de Lebu, Los Álamos, Cañete, Contulmo y Tirúa. Al Este abarca la mayor parte de Alto Biobío, una pequeña porción de Antuco y una tercera parte de Mulchén.

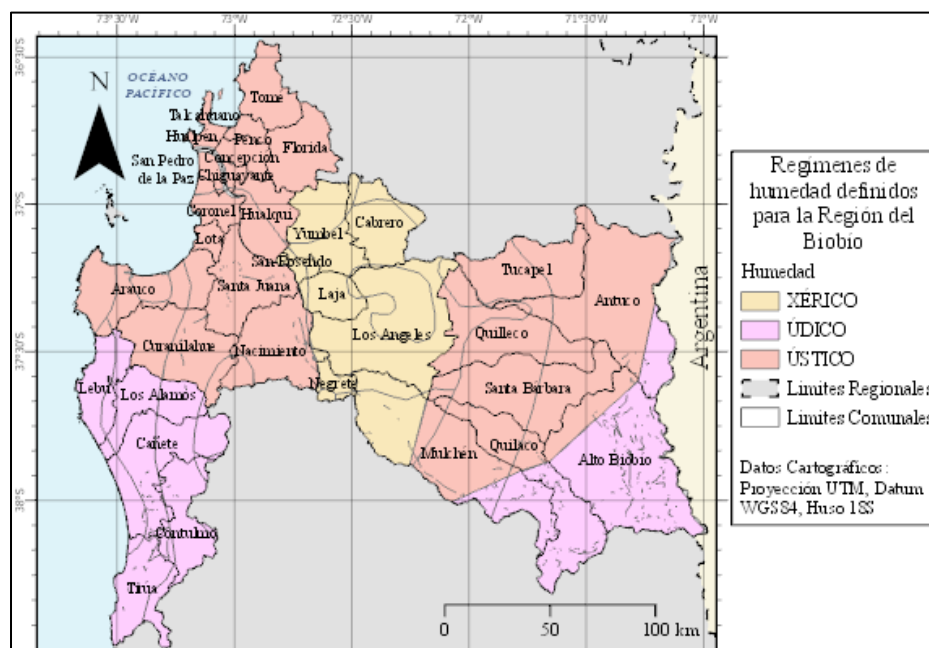


Figura 5.4: Mapa de regímenes de humedad de la región del Biobío.

4- Temperaturas medias mensuales

Las temperaturas indicarán como se “mueve” el calor dentro del sistema, es decir, si el suelo estará aportando o extrayendo calor del sistema de tuberías.

La información sobre la temperatura se alimenta con datos modelados extraídos de la Interfaz de Programación de Aplicaciones (en inglés, API) del explorador de energía renovables del Ministerio de Energía [60]. Obteniendo una malla de puntos equiespaciados y georreferenciados cada 3 kilómetros cubriendo toda la región en un archivo formato .csv generado en Excel. La tabla resultante se integra como una capa shapefile tipo punto a ArcGIS con la herramienta *XY Table To Point*.

Las capas, deben convertirse a formato ráster para realizar los cálculos, por lo que se procederá a utilizar una herramienta de ArcGIS (*IDW*) que puede convertir capas puntos a una capa ráster mediante la interpolación de los puntos por el método del inverso a la distancia generando capas de puntos que representan las temperaturas superficiales y subterráneas promedio para todos los meses del año. Repitiendo este proceso para todos los meses, se obtienen 24 capas ráster que cubren los datos térmicos de toda la región del Biobío.

5.1.3 Generación de mapas de potencial geotérmico superficial

1- Combinación de capas de suelos y humedad

Como se explicó anteriormente, la conductividad y la difusividad térmica son parámetros fundamentales al momento de realizar la evaluación de potencial geotérmico del suelo, parámetros que se ven afectados por la humedad presente en el suelo (Régimen de humedad) y por la composición o textura de este (Edafología), por lo que de cara al proyecto, para asignar las respectivas propiedades térmicas que correspondan, antes es necesario combinar en una sola capa, la información contenida en las capas de humedad y textura, esto se hace utilizando la herramienta *Merge* de ArcGIS y las capas de las *Figura 5.2 y 5.4*, resultando en una tabla de atributos combinada que contiene tanto los regímenes de humedad como la información textural. La representación de este resultado se muestra en la *Figura 5.5* a continuación.

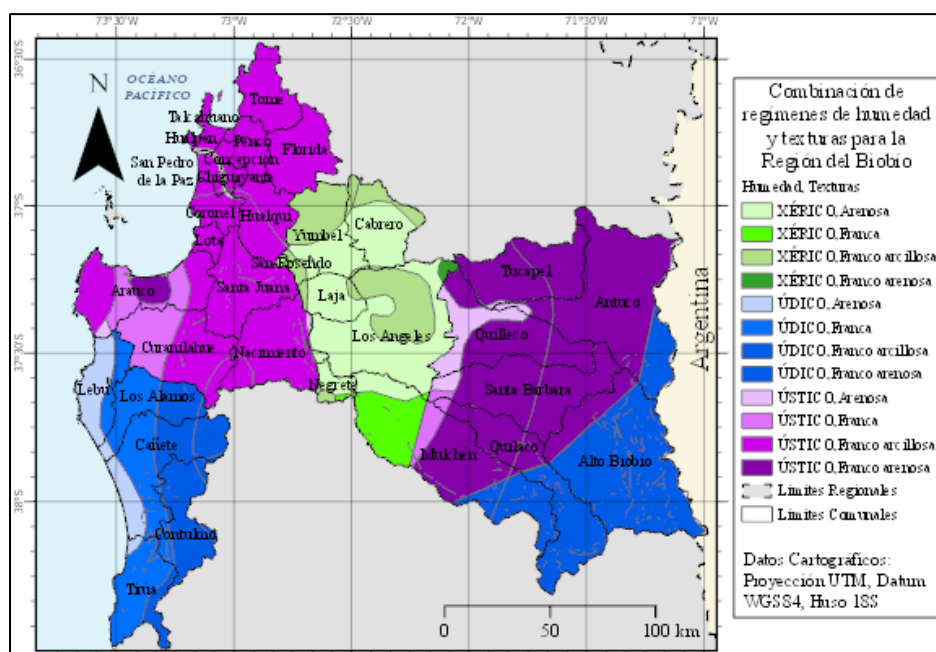


Figura 5.5: Mapa combinado de Texturas y regimenes de humedad de la región del Biobío

2- Difusividad y conductividad térmica por mes según suelo y humedad para cada mes del año.

A partir del mapa resultante del apartado anterior, con la distribución geográfica de la humedad y textura del suelo se pueden asignar las propiedades térmicas que necesita el modelo.

Para extraer los valores de conductividad y difusividad se consultó la norma VDI 4640, parte 1 [61] para materiales no consolidados. Se debe destacar que solo se estipulan datos de Arenas y Arcillas, no se diferencia entre tipos de suelos entre arenosos y arcillosos por lo que es necesario agregar valores para 3 texturas intermedias entre suelos arcillosos y arenosos, y como no hay información sobre estas, se procede a interpolar sus valores según los datos conocidos.

Tabla 5.1: Propiedades térmicas según VDI 4640 (azul) y propiedades interpoladas [61].

Sedimento o roca	Conductividad térmica Seco $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$	Conductividad térmica Húmedo $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$
Arcillosa	0,500	1,8
Franco arcillosa	0,475	1,7
Franco	0,450	1,6
Franco arenosa	0,425	1,5
Arenosa	0,400	1,4

Con estos datos se calcula la difusividad térmica para cada textura con la formula descrita en la *Ecuación (1)*:

Tabla 5.2: Difusividad térmica calculada en base a Tabla 5.1. Fuente elaboración propia.

Sedimento o roca	Difusividad térmica Seco $\left[\frac{m^2}{s}\right]$	Difusividad térmica Húmedo $\left[\frac{m^2}{s}\right]$
Arcillosa	3,226E-07	7,500E-07
Franco arcillosa	3,115E-07	7,472E-07
Franco	3,000E-7	7,441E-07
Franco arenosa	2,881E-07	7,407E-07
Arenosa	2,759E-07	7,368E-07

Ahora, esta información debe asignarse según las características territoriales (Humedad y texturas) desarrolladas en el apartado anterior y utilizando esa misma capa como base, de modo que en la tabla de atributos se deben crear 24 nuevos campos, de los cuales 12 son para ingresar la conductividad y los otros 12 son para la difusividad de enero a diciembre.

Se procede a exportar la tabla de atributos de la capa con la herramienta **Export Table**, para asignar los parámetros en Excel y posteriormente volver a ingresar la tabla completa en formato .csv a ArcGIS. La tabla no puede ingresarse como capa directamente, si no que se debe utilizar una herramienta que relaciona tablas de atributos y tablas externas según algún campo en común con la herramienta **Add Join**.

Para utilizar estos datos en la calculadora de ArcGIS, los valores para cada mes se deben convertir a ráster con la herramienta **Polygon To Raster**, obteniendo 12 capas ráster con la información de la conductividad y 12 capas con la información de difusividad.

3- Diferencia de temperaturas para cada mes del año

Otro parámetro del modelo es la diferencia entre la temperatura subterránea a 2 metros bajo tierra y la temperatura superficial, utilizando la herramienta para realizar operaciones con algebra de mapas con la herramienta **Raster Calculator**, se restan las capas de temperaturas que fueron generadas anteriormente, obteniendo así una capa para cada mes del año donde los colores de la escala van desde un color azul para los potenciales geotérmicos negativos, que indican que el suelo estará extrayendo calor de las tuberías (enfriando el fluido que pasa a través

de ellas), hasta un color rojo que representa a los potenciales geotérmicos positivos, que indica que el suelo estaría aportando calor a las tuberías (Calentando el fluido que pasa a través de ellas) Como se muestra en la *Figura 5.6* a continuación.

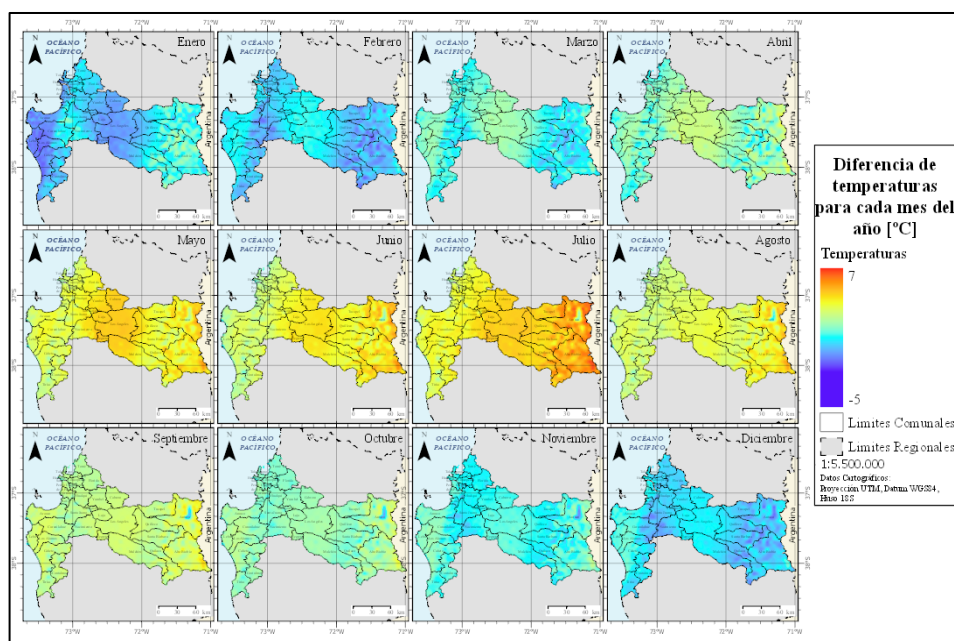


Figura 5.6: Diferencia de temperatura entre la temperatura subterránea y la temperatura atmosférica para todos los meses del año.

5.2 Método specific heat Exchanger (sHE)

5.2.1 Selección de datos de entrada

El método Specific Heat Exchanger (sHE) estima el potencial geotérmico para captaciones verticales cerradas a partir de valores específicos de extracción en $\left[\frac{W}{m}\right]$, los cuales se asignan según el tipo de roca o sedimento que corresponda y sus condiciones hidrogeológicas. Posteriormente, estos valores se integran con la profundidad de estudio (en este caso, 100 [m]) para generar un mapa regional de potencial.

Para implementar este método, se requiere como principal fuente de datos en ArcGIS la cartografía geológica de la Región, ya que, la litología define los valores sHE. En este trabajo se utiliza el Mapa Geológico de Chile 1:1.000.000, que clasifica las unidades geológicas presentes en el subsuelo y permite asignar valores de captación de acuerdo con la norma VDI 4640.

Además, es necesario incorporar información del nivel de agua subterránea, debido a que en litologías sedimentarias la presencia de saturación modifica significativamente la capacidad de intercambio térmico y, por tanto, el valor sHE asignado

Finalmente, se recopila información complementaria sobre estratigrafía en sectores costeros, ya que en estas áreas el espesor sedimentario puede ser menor y el contacto con basamento rocoso puede ocurrir a profundidades relativamente bajas. Esta condición obliga a representar adecuadamente la columna geológica efectiva dentro del intervalo de 0 a 100 [m] para que el cálculo del potencial sea consistente con la realidad geológica local.

5.2.2 Procesamiento de la información

1- Generación de mapas base

El procesamiento del método sHE comienza con la preparación de la cartografía geológica, ya que, la litología controla la asignación del valor sHE y la hidrogeología (presencia de agua) modifica dicho valor en materiales no consolidados. Por esta razón, el mapa geológico se divide en dos focos: unidades consolidadas y unidades no consolidadas. Esta separación no busca simplificar la geología, sino aplicar correctamente los valores de extracción específicos y en los depósitos no consolidados es necesario distinguir entre condiciones secas y saturadas, mientras que en unidades rocosas el valor se asigna por el tipo de litología estipulada en la norma VDI 4640.

Se comienza analizando el campo “geo” de la tabla de atributos del mapa geológico de la región, campo en el cual cada litología tiene un código que la identifica según sus características. Para realizar la división, en ArcGIS se seleccionan las litologías sedimentarias. Una vez seleccionadas, se procede a exportar la selección en una nueva capa con la herramienta **Export Features** indicando que debe exportarse solo la parte de la tabla que está seleccionada. Luego se repite el proceso, invirtiendo la selección capa con las geologías rocosas, obteniendo 2 capas que se muestran combinadas en el mapa de la *Figura 5.7*.

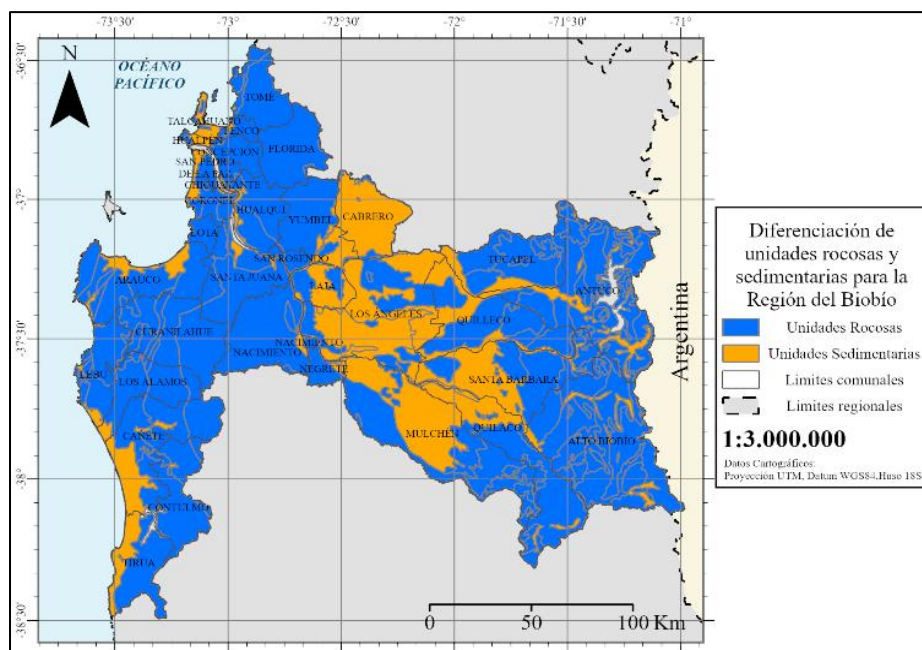


Figura 5.7: Diferenciación de geologías rocosas y sedimentarias para toda la región del Biobío.

El siguiente paso consiste en estimar la profundidad del nivel freático desde la superficie dentro de las unidades sedimentarias, con el fin de subdividir la columna de estudio en un tramo no saturado (por sobre el nivel freático) y un tramo saturado (bajo el nivel freático). Para ello, la profundidad del agua subterránea se obtiene a partir de registros de pozos, utilizando el dato denominado “nivel estático”, recopilado desde distintos estudios hidrogeológicos que reportan mediciones en diversos puntos de la región [44], [62 -66].

La información sobre el nivel estático del agua subterránea recopilada desde los distintos estudios se procesó mediante dos estrategias, en función del formato y los datos disponibles.

En primer lugar, cuando los documentos incluían tablas con coordenadas y valores de nivel estático, la información fue extraída e incorporada a ArcGIS desde un archivo .csv y convertida una capa de puntos georreferenciada con la herramienta *XY Table To Point*.

En segundo lugar, en aquellos casos donde los estudios reportaban valores de nivel estático, pero no entregaban directamente la ubicación mediante coordenadas (por ejemplo, cuando la información se presentaba únicamente en mapas o figuras), se recurrió a un procedimiento de georreferenciación manual. Para ello, las imágenes relevantes fueron incorporadas al proyecto y ajustadas espacialmente utilizando puntos de control sobre

cartografía base con la herramienta *Add Control Points*, con el fin de ubicarlas correctamente en el sistema de referencia del estudio. Una vez georreferenciadas, se digitalizaron los puntos correspondientes a los pozos agregando un nuevo shapefile tipo punto.

En relación con lo anterior, existe una ausencia de registros de pozos en el tramo costero comprendido entre Lebu y Quilantahue. Por esta razón, la profundidad del nivel freático en ese sector se estimó a partir de la información hidrogeológica disponible [44].

Con el fin de incorporar esta estimación al modelo espacial, se definieron condiciones de borde que permitieran representar la transición del nivel freático en el área sin mediciones. Para ello, se construyeron dos elementos shapefile tipo línea de referencia asociados a la geometría del polígono sedimentario. Una línea a lo largo del borde costero occidental, utilizada como aproximación del nivel del mar (nivel estático 0 [m]), y una línea en el límite oriental del sector sin datos, donde se asignaron los valores de profundidad estimados según la fuente utilizada. Posteriormente, estas líneas se transformaron en puntos de control y se integraron con el conjunto regional de observaciones, con el objetivo de mejorar la interpolación de la superficie de profundidad al agua en el tramo costero.

2- Asignación de parámetros sHE

En esta etapa se asignaron los valores de extracción específica (sHE) a las unidades geológicas del área de estudio, de modo de representar la capacidad de intercambio térmico del subsuelo para captaciones verticales cerradas. La asignación se realizó a partir de la cartografía geológica utilizada en el proyecto y de los rangos tabulados en la norma VDI 4640 (Tabla completa de la norma en *ANEXOS B: parámetros*), estableciendo una correspondencia entre la descripción litológica de cada unidad (p. ej., tipo de roca/sedimento o el grado de consolidación) y la categoría más representativa disponible en dicha norma.

Para aplicar este criterio en el entorno SIG, cada unidad del mapa fue clasificada según su litología dominante y se le asignó un valor sHE consistente con esa caracterización. En el caso de materiales no consolidados, la asignación distinguió entre condiciones no saturadas y saturadas, dado que la presencia de agua subterránea modifica de forma significativa la capacidad de intercambio térmico y, por tanto, el valor sHE aplicable. El resultado de este

proceso se incorporó como un atributo por unidad geológica a un campo creado en la tabla de atributos como “sHE” con la herramienta *Add*, generando dos capas que se trabajarán por separado para sedimentos no saturados y saturados, denominadas “sHE_Sedimentos_Seco” y “sHE_Sedimentos_Húmedo”, respectivamente.

3- Cálculo de capas de profundidad

Con las mediciones de nivel estático recopiladas en el apartado anterior, se estimó la distribución espacial de la profundidad al agua subterránea mediante interpolación con la herramienta *IDW*. Esta operación permitió obtener un ráster que representa la profundidad del nivel freático desde la superficie, es decir, la capa superficial de litologías sedimentarias no saturadas, que es llamada “IDW_PUNTOS_5”.

Se definió una profundidad total de estudio de 100 [m] (columna 0–100 [m]). Para reflejar esto en ArcGIS, se utilizó el polígono regional como máscara espacial y se generó un ráster con la herramienta *Feature to Raster* con valor fijo igual a 100 [m], denominado “PROFUNDIDAD_TOTAL”, que actúa como referencia para las operaciones posteriores de partición de espesores y cálculo del potencial.

Se estimaron los espesores relativos de los tramos no saturado y saturado en las unidades sedimentarias. Calculado mediante álgebra de mapas con la herramienta *Raster Calculator*. Se restó la capa “PROFUNDIDAD_TOTAL” con “IDW_PUNTOS_5”, obteniendo una nueva capa que representa la columna de litologías sedimentarias saturadas llamada “Prof_saturada_1”. La representación del resultado de las capas saturada y no saturada se muestra en la *Figura 5.8*.

$$"PROFUNDIDAD_TOTAL" - "IDW_PUNTOS_5"$$

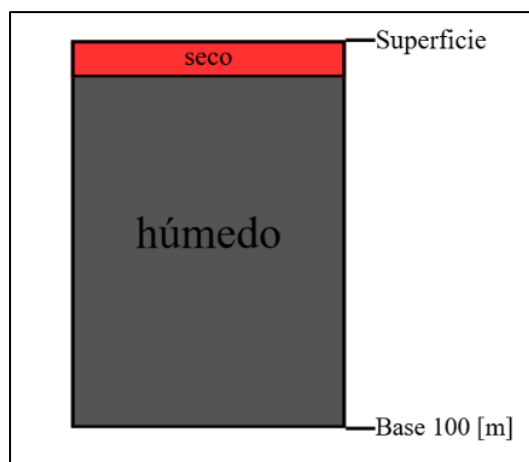


Figura 5.8: Representación de división de unidades sedimentarias saturadas y no saturadas.

Adicionalmente, el sector costero se aborda de forma diferenciada debido a que, en gran parte de la franja litoral, el espesor de las unidades sedimentarias es menor y el contacto con la roca de basamento puede ocurrir a profundidades relativamente someras dentro del intervalo de 0–100 [m].

En consecuencia, las unidades sedimentarias litorales se separaron como un subconjunto de trabajo, provocando que se generaran 3 capas en las zonas litorales que representan toda la profundidad de estudio para representar explícitamente la contribución del basamento dentro del intervalo de análisis (de 0 a 100 [m] de profundidad), se realiza el mismo proceso al de la separación de unidades sedimentarias y rocosas, realizado en el primer paso de este apartado.

Dado que en el borde litoral los depósitos asociados a terrazas marinas presentan espesores variables del orden de 18 a 30 [m] [44], se adoptó este rango como aproximación para representar la profundidad del contacto sedimento–basamento a escala regional, por lo que se asignó una profundidad de contacto de 30 [m] hacia el borde occidental (más próximo al litoral) y de 18 m hacia el borde oriental (más alejado del litoral). Con estos valores se construyó una superficie continua de profundidad al basamento mediante interpolación espacial, obteniendo el ráster “IDW_BASAMENTOS”, el cual se utiliza posteriormente para calcular el espesor del basamento y de los sedimentos dentro de la columna de 100 [m] en el sector costero.

Para obtener una capa que contenga información sobre el espesor del basamento, se realiza una operación entre la capa “PROFUNDIDAD_TOTAL” y el ultimo ráster creado con álgebra de mapas. Generando la capa “PROFUNDIDAD_BASAMENTOS”

$$"PROFUNDIDAD_TOTAL" - "IDW_BASAMENTOS"$$

La capa que indica el espesor de la zona saturada de los sedimentos se calcula operando la capa que representa el espesor del basamento y la capa superficial que representa la zona no saturada de las unidades sedimentarias. Finalmente, la representación del resultado de las 3 capas creadas se muestra en la *Figura 5.9*.

$$"IDW_BASAMENTOS" - "IDW_PUNTOS_5"$$

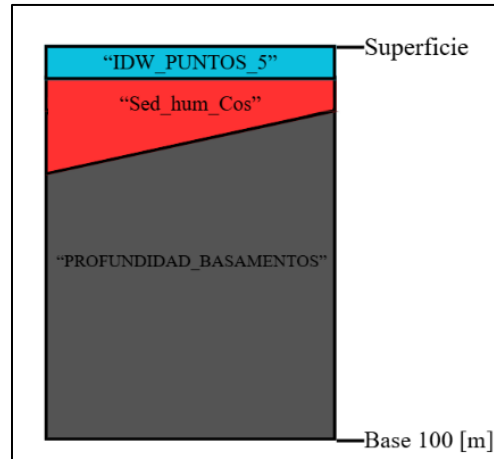


Figura 5.9: Representación de la combinación de las capas que representa la columna de estudio en las zonas litorales sedimentarias.

4- Generación de mapa de Potencial geotérmico según método sHE

Una vez preparadas las capas de entrada del método, el objetivo de esta etapa es construir un único ráster que represente el potencial geotérmico específico para captaciones verticales cerradas, expresado en $\left[\frac{W}{m}\right]$. Todas las operaciones se realizan con la herramienta **Raster Calculator**.

Conceptualmente, el método se basa en que cada unidad geológica posee un valor sHE $\left[\frac{W}{m}\right]$ asociado a su litología (y, en sedimentos, a su condición de saturación). Para obtener la potencia total disponible en la columna de estudio (0–100 [m]), se multiplica el valor sHE por el espesor efectivo en [m] de cada tramo dentro de esa columna, considerando que en parte de ese tramo podría haber contactos entre distintas unidades geológicas. El resultado intermedio de esa operación es una potencia en [W] para cada celda del ráster. Finalmente, esa potencia se

normaliza por la profundidad total para volver a expresarla como $\left[\frac{W}{m}\right]$. A continuación, en las *Tablas 5.3, 5.4 y 5.5* se muestran las operaciones realizadas.

Tabla 5.3: Cálculo de potencia en [W] en unidades rocosas y sedimentarias, excluyendo el litoral por presencia de contacto sedimento–basamento dentro de los 100 [m] de profundidad de estudio.

Descripción	Operación realizada	Capa resultante
Potencia de secuencias rocosas	"sHE_Rocas" · "PROFUNDIDAD_TOTAL"	"Potencia_rocas"
Potencia de sedimentos secos	"She_Sedimentos_Secos" · "IDW_PUNTOS_5"	"POT_SED_VC_seco"
Potencia de sedimentos húmedos	"sHE_Sedimentos_Humedo" · "Prof_saturada_1"	"POT_SED_VC_HUM"

Tabla 5.3: Cálculo de potencias en [W] para el sector costero, donde el contacto sedimento–basamento puede darse dentro de los 100 [m] de profundidad del estudio.

Descripción	Operación entre rasters	Capa resultante
Potencia de Basamento	sHE_Basamentos" · "PROFUNDIDAD_BASAMENTOS"	"POTENCIA_BASAMENTOS"
Potencia de sedimentos costeros secos	"She_Sedimentos_Secos" · "IDW_PUNTOS_5"	"POTENCIA_sED_COST_SEC"
Potencia de sedimentos costeros húmedos	"sHE_Sedimentos_Humedo" · "Prof_saturada_1"	"Potencia_sed_cos_hum"

Tabla 5.4: Operaciones de cálculo de potencia total en [W] de las unidades sedimentarias, incluido los basamentos costeros.

Descripción	Operación entre rasters	Capa resultante
Suma de las capas que corresponden a la costa	"POTENCIA_BASAMENTOS" + "POTENCIA_sED_COST_SEC" + "Potencia_sed_cos_hum"	"POTENCIA_Sed_COST"
Capa sedimentaria	"POT_SED_VC_seco" + "POT_SED_VC_HUM"	"POT_SED_VC"

Las capas ráster resultantes del proceso "**POTENCIA_Sed_COST**", "**POT_SED_VC**" y "**Potencia_rocas**" se combinan en una sola con la herramienta *Mosaic To New Raster*. Y finalmente, con el algebra de mapas esta última capa se divide por 100 para obtener la potencia

promedio por metro de profundidad $\left[\frac{W}{m}\right]$ obteniendo así un mapa de potencial geotérmico por método sHE.

A continuación, teniendo en cuenta que de la dinámica geotérmica en la zona cordillerana es diferente debido la presencia de fuentes de calor, relacionado con la actividad volcánica, por lo que, por definición, el método sHE no es aplicable, así que se procede a excluir el sector de la región en el que se estima que el método sHE no es aplicable. A partir del análisis de estudios volcánicos [67 - 91], se delimitaron las zonas aproximadas en las cuales la actividad volcánica e hidrotermal afectan el gradiente geotérmico, actuando como una fuente de calor. Para esto, se creó un shapefile tipo polígono para delimitar las zonas mencionadas y en base a este, extraerlas con la herramienta ***Extract By Mask***.

6 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos en la creación de los diferentes mapas de potencial de energía geotérmica, en base a las 2 metodologías aplicadas. El análisis se organiza para cada método mediante una descripción de la representación gráfica de los mapas obtenidos con cada modelo, las estadísticas principales, la comparación de los resultados obtenidos con otros estudios previos, la distribución espacial e interpretación del potencial geotérmico estimado y las oportunidades de mejora que se identifican.

6.1 Método de captaciones horizontales

6.1.1 Representación gráfica

Los mapas generados a partir de las coberturas ráster que contienen el potencial de energía geotérmica superficial para los 2 primeros metros bajo la superficie terrestre, medido en $\left[\frac{W}{m^2}\right]$, con valores que varían según la estacionalidad y meteorología, muestran los valores para cada uno de los 12 meses del año.

Los mapas generados poseen la escala original del mapa de suelos de Sudamérica [56] 1:1.000.000 con proyección cartográfica UTM huso 18S, DATUM WGS84. Aunque, para que los mapas pudieran visualizarse en el formato que se mostrará a continuación fue necesario representarlo a una menor escala 1:5.500.000.

En estos mapas los valores de potencial de energía geotérmica se representan gráficamente mediante una escala de intervalos de color y como se puede apreciar en la *Figura 6.1*, van desde un color azul para los potenciales geotérmicos negativos, que indican que el suelo estará extrayendo calor de las tuberías (enfriando el fluido que pasa a través de ellas), hasta un color rojo que representa a los potenciales geotérmicos positivos, que indica que el suelo estaría aportando calor a las tuberías (Calentando el fluido que pasa a través de ellas).

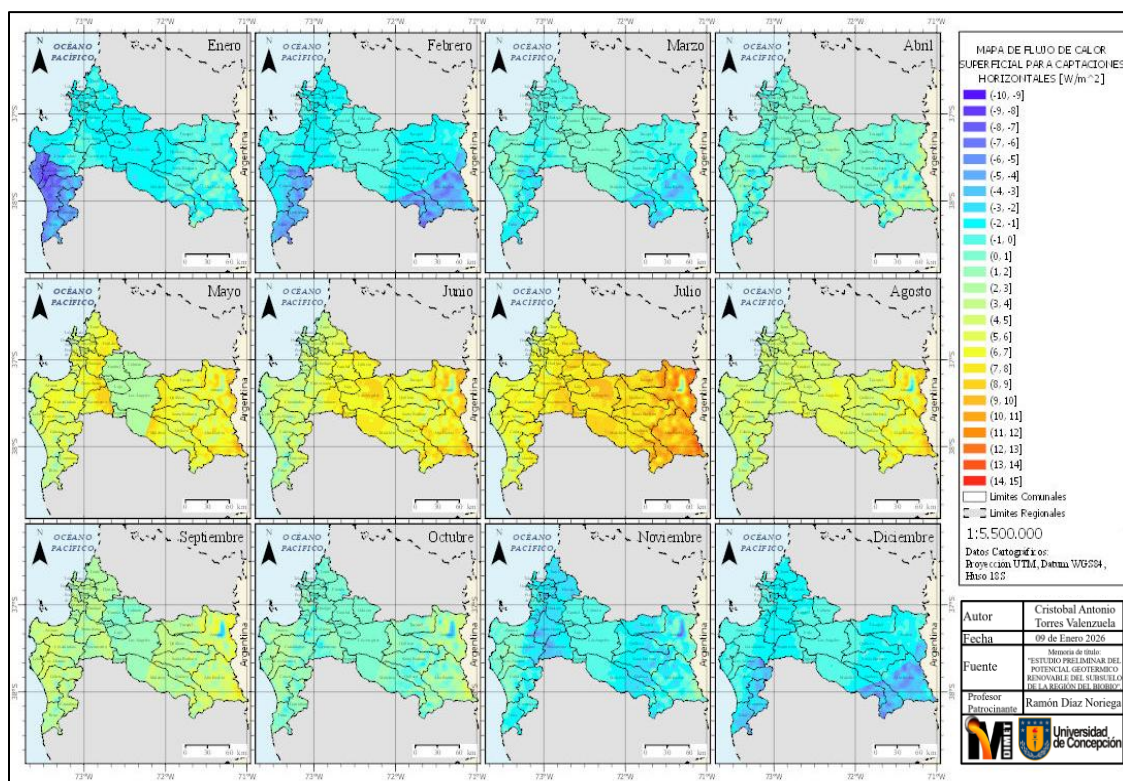


Figura 6.1: Mapa de potencial geotérmico para sistemas de captación horizontales para cada mes del año.

6.1.2 Estadísticas generales

El análisis estadístico del mapa generado con el método para captaciones horizontales muestra un rango de valores de potencial de captación horizontal que varían entre $-9,74 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ y $13,2 \left[\frac{W}{m^2} \right]$, durante el año. Estos resultados indican que, en general, la región presenta unos valores adecuados para instalaciones de captación horizontal utilizando tecnología de aprovechamiento con bomba de calor geotérmica para aplicaciones de calefacción de ambientes, siendo los valores extremos aquellos en lo que se hay mayor diferencia de temperaturas entre el ambiente y el suelo. Aunque se identifican áreas puntuales con picos de potencial, lo que se atribuye al fenómeno de microclimas, como por ejemplo en la comuna de Antuco. A Continuación, se presentará una tabla con las estadísticas para cada mes del año.

Tabla 6.1: Estadísticas básicas de los resultados del método para captaciones horizontales.

Mes	Minimo	Máximo	Media	Desviación estándar
-----	--------	--------	-------	---------------------

Enero $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	-9,74	2,78	-1,74	1,78
Febrero $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	-7,83	-0,260	-1,86	1,50
Marzo $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	-5,89	2,30	-0,540	1,05
Abril $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	-5,10	5,65	0,50	0,900
Mayo $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	-2,95	10,7	5,29	1,82
Junio $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	-4,41	11,3	5,77	1,75
Julio $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	-1,87	13,2	7,73	1,76
Agosto $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	-2,38	10,20	4,96	1,28
Septiembre $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	-4,40	8,08	2,96	1,39
Octubre $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	-5,29	5,90	1,06	1,10
Noviembre $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	-6,53	2,95	-1,06	1,22
Diciembre $\left[\frac{W}{m^2}\right]$	-6,86	0,905	-1,53	1,16

6.1.3 Interpretación del potencial geotérmico

Los datos que entrega la evaluación del sistema geotérmico de calefacción cerrado horizontal corresponden a la energía extraíble (equivalente a potencia térmica por unidad de área). Existen dos formas de usar este resultado: para conocer la potencia térmica extraíble que una instalación con cierta área puede entregar o para conocer el área que se requiere excavar para lograr una potencia objetivo, valor que servirá como referencia para el implementador del sistema de la bomba de calor. También se puede apreciar como varían los valores según el tipo de suelo y clima presente en la zona, dependiendo del mes del año que se esté analizando.

Se puede ver como en los meses más calurosos, los valores de potencial aprovechable son negativos, esto quiere decir que, para esos meses, el suelo en el que estén instaladas las tuberías, aportaría al sistema de captación como un enfriador del fluido que se esté utilizando, lo que se traduce a que el sistema geotérmico funcionara como enfriador de ambientes. Al contrario, cuanto los valores de potencial aprovechable son positivos, es decir, que el subsuelo está aportando energía al sistema, lo que se traduce a que el sistema geotérmico cumplirá la función de calentar espacios.

Con el fin de validar los resultados, se busca cubrir la demanda de una vivienda de 100 $[m^2]$, para lo cual, se consideran requerimientos definidos por los *Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas de Chile* [45]. El objetivo es demostrar que el recurso geotérmico de baja entalpía en la Región del Biobío es suficiente para cubrir la demanda máxima anual de calefacción.

Para empezar, según la *calculadora de calefacción sustentable* [92] el estándar de potencia necesaria para calefaccionar una vivienda de 100 $[m^2]$ y un piso es de 6.000 [W] o 60 $[\frac{W}{m^2}]$, además, según los *Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas de Chile* la eficiencia (o COP) base para una bomba de calor suelo-agua es de 3,2.

Para calcular el aporte del suelo al sistema, se utiliza la formulación de balance energético en bombas de calor. La potencia eléctrica consumida por el compresor de la bomba de calor ($W_{el\acute{e}ctrico}$) corresponde a la resta entre la potencia de calefacción de la vivienda ($Q_{calefacción}$) y la potencia absorbida desde el terreno (Q_{suelo}).

Además, La eficiencia del equipo se expresa mediante el coeficiente de desempeño o *COP*, lo que permite relacionar la potencia requerida por la vivienda y la potencia aportada por el suelo.

$$COP = \frac{Q_{calefacción}}{W_{el\acute{e}ctrico}}$$

$$W_{el\acute{e}ctrico} = \frac{Q_{calefacción}}{COP}$$

Reemplazando en la formula, la potencia eléctrica:

$$Q_{suelo} = Q_{calefacción} - \left(\frac{Q_{calefacción}}{COP} \right)$$

$$Q_{suelo} = Q_{calefacción} \cdot \left(1 - \frac{1}{COP} \right)$$

Con esta fórmula se obtiene que:

$$Q_{suelo} = 6.000 \cdot \left(1 - \frac{1}{3,2}\right) \approx 4.125 [W]$$

Para un valor máximo de $13,2 \left[\frac{W}{m^2}\right]$ para el mes de Julio, para obtener esta potencia desde el suelo, es necesario cubrir un área aproximadamente $308 [m^2]$, lo que es un valor bastante realista para el tipo de configuración del sistema geotérmico y suficiente para sostener la demanda de calefacción de una vivienda según los parámetros establecidos, además se debe considerar que hay otros tipos de configuraciones de tuberías (como en espiral o en más de 1 nivel), lo que puede hacer más eficiente el sistema y reducir bastante el área necesaria.

Ahora, según los “*Estándares de Construcción Sustentable*” [45], la vivienda en la zona con mayor requerimiento, previamente definida debe requerir aproximadamente:

- **Exigencia (Zona F):** $135 \left[\frac{kWh}{m^2} \text{ año}\right]$.
- **Tipo de vivienda:** $100 [m^2]$.
- **Energía total requerida por la vivienda:**

$$135 \left[\frac{kWh}{m^2}\right] \cdot 100[m^2] = 13.500 \left[\frac{kWh}{\text{año}}\right]$$

Para calcular la energía total del sistema definido, se utiliza el dimensionamiento necesario y la eficiencia mínima exigida (COP 3,2).

- **Potencia Extraída del Suelo (Q_{suelo}):** $4125 [W]$.
- **Horas de Operación (t):** $2.400 \left[\frac{h}{\text{año}}\right]$.
- **Energía Extraída del Suelo (W_{suelo}):** $4.125 [W] \cdot 2.400 [h] = 9.900 \left[\frac{kWh}{\text{año}}\right]$.
- **Energía eléctrica consumida ($W_{eléctrica}$):** $(6.000 [W] - 4.125 [W]) \cdot 2.400 [h] = 4.500 \left[\frac{kWh}{\text{año}}\right]$
- **Energía Total entregada a la vivienda (W_{total}):**

$$9.900 \left[\frac{kWh}{año} \right] + 4.500 \left[\frac{kWh}{año} \right] = 14.400 \left[\frac{kWh}{año} \right]$$

Lo que indica que el dimensionamiento mínimo ($308 [m^2]$) basado en el potencial máximo regional para el mes de Julio ($13,2 \left[\frac{W}{m^2} \right]$) produce un total de $14.400 \left[\frac{kWh}{año} \right]$ de calor y dado que este valor supera los $13.500 \left[\frac{kWh}{año} \right]$ de demanda, se confirma que el potencial geotérmico del lugar estudiado es suficiente para suplir lo necesario para la vivienda.

6.1.4 Oportunidades de mejora

En el caso de este sistema, el modelo posee una fuerte dependencia climatológica. Considerando el contexto actual a nivel global marcado por el cambio climático, se recomienda tener en cuenta posibles diferencias en las estimaciones realizadas para años particularmente secos o lluviosos, como fue el caso del año 2024 que fue especialmente lluvioso. Estas variaciones pueden alterar directamente los parámetros de conductividad y difusividad térmica. Por lo tanto, en caso de que se requiera realizar mediciones para un año específico, se recomienda actualizar las variables climáticas y edáficas involucradas, utilizando datos recientes y representativos del periodo de estudio.

Una segunda limitación se relaciona con la cartografía de suelos utilizada como base del modelo en ArcGIS. Dado que este mapa fue construido con información de hace varias décadas, su nivel de detalle puede ser insuficiente cuando se busca interpretar resultados a escalas locales o comunales. Por ello, una mejora relevante consiste en incorporar cartografía edafológica más reciente o de mayor resolución, especialmente en zonas donde la heterogeneidad del suelo es alta y puede modificar de forma importante los parámetros térmicos asignados.

Asimismo, durante la ejecución del modelo se evidenció que una de las restricciones más importantes es la limitada disponibilidad de datos con respecto a las propiedades térmicas del suelo, en particular la conductividad térmica (K) y la difusividad térmica (α). Estas propiedades controlan directamente la capacidad del subsuelo para transferir y propagar calor y, por tanto, condicionan el potencial estimado. En futuros desarrollos, la incorporación de mediciones locales o bases de datos experimentales específicas para suelos de Chile permitiría reducir la

dependencia de valores bibliográficos estandarizados y aumentar la representatividad de los resultados.

En línea con lo anterior, aunque el modelo se fundamenta en información pública y bibliografía especializada, la ausencia de validación sistemática en terreno constituye una limitación metodológica relevante. Es necesario implementar campañas de medición, de modo de contrastar resultados modelados con condiciones reales y ajustar los parámetros más sensibles. Lo que incrementaría la confiabilidad del modelo.

Adicionalmente, el enfoque aplicado incorpora simplificaciones propias del contexto de un estudio regional preliminar. Sin embargo, existen condiciones que pueden modificar el balance térmico superficial y que no se consideran, como la cobertura vegetal, la evapotranspiración, la elevación, la orientación del terreno, y la presencia de rellenos o estructuras artificiales con propiedades térmicas distintas al suelo natural. Integrar estas variables en versiones futuras permitiría una evaluación más robusta, especialmente para aplicaciones locales o para apoyar decisiones de diseño a escala de proyecto.

Finalmente, para obtener una formulación operativa fue necesario fijar parámetros constructivos estándar. Si bien esta decisión es coherente con el carácter simplificado del modelo, en la práctica dichos parámetros son muy variables según el tipo de proyecto, condiciones del terreno y estrategia de operación del sistema. Por ello, una mejora directa consiste en adaptar estos parámetros según cada proyecto, de forma de entregar resultados más útiles para el dimensionamiento de sistemas reales.

6.2 Método sHE

6.2.1 Representación gráfica

Los mapas generados a partir de las coberturas ráster que contienen el potencial de energía geotérmica, medido en $\left[\frac{W}{m}\right]$, se muestran suponiendo un funcionamiento de 2400 horas al año con una profundidad por pozo de 100 [m].

Los mapas generados poseen la escala original 1:1.000.000 con proyección cartográfica UTM huso 18S, DATUM WGS84. Aunque, para el formato de los mapas del estudio se han representado a una menor escala 1:3.000.000.

En estos mapas, en la *Figura 6.2* los valores de potencial de energía geotérmica se representan gráficamente mediante una gama de color que va desde un color amarillo para los potenciales geotérmicos más bajos al color rojo que representa a los potenciales geotérmicos más altos.

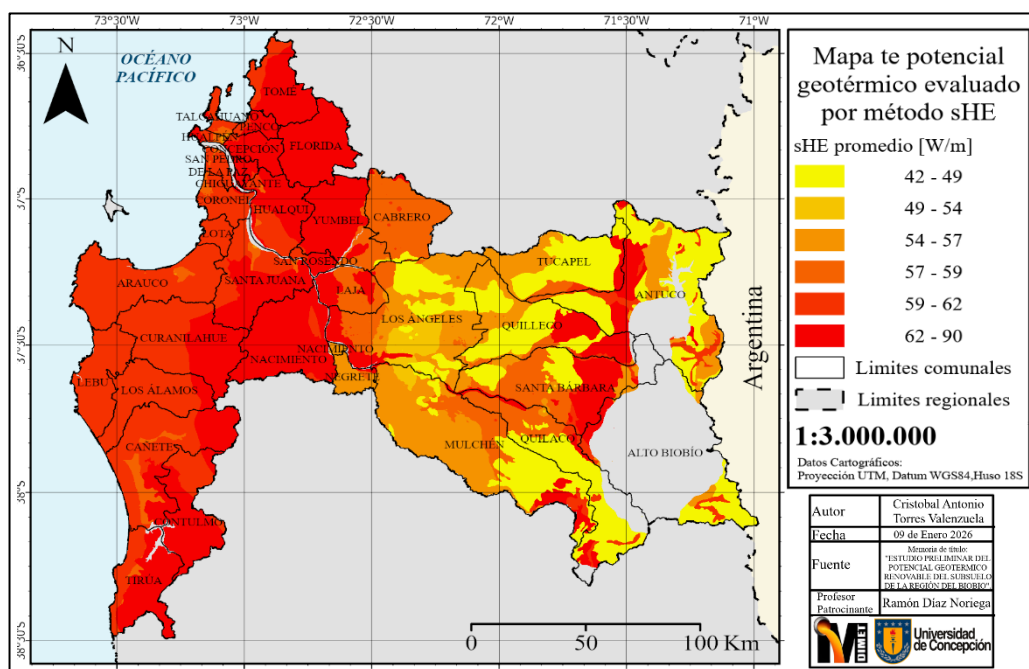


Figura 6.2: Mapa de potencial geotérmico para sistemas de configuración vertical. Fuente: Elaboración propia.

6.2.2 Estadísticas generales

El análisis estadístico del mapa generado con el método sHE, muestra un rango de valores que varía entre $42,3 \left[\frac{W}{m} \right]$ y $90 \left[\frac{W}{m} \right]$, con un promedio de $59 \left[\frac{W}{m} \right]$ y una desviación estándar de $5,85 \left[\frac{W}{m} \right]$. Estos resultados indican que, en general, la región presenta un potencial moderado para la instalación de sondas geotérmicas verticales, siendo los valores más altos asociados a zonas con litologías consolidada. la desviación estándar reducida sugiere una distribución relativamente homogénea del potencial en la mayor parte del territorio, aunque se identifican áreas puntuales con mayor capacidad de extracción, principalmente en sectores donde predominan rocas.

Tabla 6.2: Estadísticas principales para el método sHE. Fuente Elaboración propia.

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Nº de columnas	Nº de filas
sHE_Promedio [W/m]	42,3	90	59	5,85	23.515	20.721

6.2.3 Comparación de resultados

Los modelos generados a partir del método sHE se comparan a una investigación similar. Llevada a cabo en la región de los Ríos [93], trabajo que determinó las zonas con mayor factibilidad para la instalación de sistemas geotérmicos verticales cerrados, a partir de información geológica e hidrogeológica. El potencial geotérmico fue determinado por interpolación mediante spline con barreras en base a información de pozos con información estratigráfica. Se considera un funcionamiento de la bomba de calor de potencia máxima de 30 [kW] y 2400 horas al año.

El rango de resultados que arroja el modelo generado para la región de los Ríos se encuentra entre los 20-80 [W/m], mientras que los determinados a partir de un volumen mayor de información [52] lo estima en 43-86 [W/m]. Se asume que los datos realizados en el estudio son correctos, debido a que fue realizado y publicado por un ente gubernamental, que demuestra rigurosidad al llevarlo a cabo, producto del trabajo e información recopilada, el modelo propuesto en este estudio ofrece una aproximación levemente sobre estimada, que se atribuye principalmente a las diferencias geológicas, e hidrogeológicas de cada región y considerando el carácter preliminar de los valores de potencial geotérmico de muy baja entalpía, podría decirse que los resultados de este estudio corresponden a una buena aproximación a la realidad.

6.2.4 Interpretación del potencial geotérmico

Los datos que entrega la evaluación del sistema geotérmico de calefacción cerrado vertical corresponden a la energía extraíble (equivalente a potencia térmica por unidad de longitud). Existen dos formas de usar este resultado: para conocer la potencia térmica extraíble que una instalación con cierta profundidad (L) puede entregar o para conocer qué profundidad se requiere perforar para lograr una potencia objetivo, referencial para el implementador de la

bomba de calor. También se puede apreciar como varían los valores según el tipo de geología que hay en la zona, mostrando una diferencia en algunos sectores en el que el valor de potencial no varía, lo que se debe a la presencia de litologías rocosas, las cuales tienen un valor fijo según la norma alemana VDI 4640.

Por ejemplo, siguiendo la misma línea que el método anterior, integrando los resultados de potencial modelado con las exigencias de demanda energética establecidas por los “*Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas de Chile*” [45]. El objetivo es demostrar que el recurso geotérmico de baja entalpía en la Región del Biobío es suficiente para cubrir la demanda máxima anual de calefacción, bajo ciertos criterios de eficiencia ($COP = 3,2$) y considerando que el estándar de potencia recomendada para calefaccionar una vivienda de un piso y de $100 [m^2]$ es de $6.000 [W]$ o $60 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ según la “*calculadora de calefacción sustentable*” (Ministerio de Medio Ambiente).

Se tiene que la potencia requerida por el sistema, para ser aportada por el suelo es de:

$$Q_{suelo} = 6.000 \cdot \left(1 - \frac{1}{3,2} \right) \approx 4.125 [W]$$

Para un valor promedio de $50 \left[\frac{W}{m} \right]$ de valor sHE para el Valle Central se obtiene que, para obtener esta potencia desde el suelo, es necesario hacer una sola perforación de aproximadamente $82,5 [m]$ de profundidad, lo es perfectamente reproducible en la vida real, adecuado para el método de evaluación de potencial y suficiente para sostener la demanda de calefacción de una vivienda según los parámetros establecidos.

6.2.5 Oportunidades de mejora

En primer lugar, los resultados obtenidos mediante el método sHE deben interpretarse como una aproximación de referencia para evaluación preliminar, dado que se sustentan en valores tabulados y simplificaciones que no incorporan explícitamente condiciones locales tales como evapotranspiración, cobertura vegetal, discontinuidades, pendiente del terreno o presencia de rellenos y estructuras artificiales, factores que pueden modificar el intercambio térmico real. En consecuencia, el uso del mapa a escala de proyecto requiere complementarse con antecedentes específicos del sitio y criterios de diseño acordes a las condiciones locales.

Una de las principales oportunidades de mejora corresponde a la validación empírica del modelo. Si bien la implementación se apoya en información pública y bibliografía especializada, la ausencia de contrastación con mediciones en terreno limita la confianza en los valores representados y la cuantificación de su incertidumbre. Por ello, se recomienda desarrollar campañas de medición que permitan comparar los resultados modelados con condiciones reales, ajustar los parámetros más sensibles y, con ello, aumentar la precisión del método en futuras implementaciones.

En segundo lugar, el desempeño del método sHE depende fuertemente de la calidad de la información litoestratigráfica disponible. Idealmente, el valor de captación debe determinarse a partir de las unidades litoestratigráficas y su secuencia vertical, de modo de representar la variación de las propiedades por estratos y aplicar el cálculo ponderando los espesores. Sin embargo, a escala regional y con la información pública disponible, el mayor nivel de detalle alcanzable se limita a distinguir entre dominios sedimentarios y su contacto con el basamento. En consecuencia, una mejora relevante consiste en incorporar la información estratigráfica que permita caracterizar de mejor manera la columna de 100 [m] y reducir el error asociado a la generalización de unidades geológicas.

Asimismo, el modelo hidrogeológico constituye un componente vital para el método, ya que la presencia de agua subterránea modifica de manera significativa la capacidad de intercambio térmico en materiales no consolidados y modifica los valores sHE. La construcción del nivel freático es compleja debido a la muy limitada disponibilidad de datos de monitoreo, por lo que se recomienda detallar esta información mediante estudios adicionales como campañas de medición en terreno a nivel regional.

Finalmente, las condiciones climáticas influyen indirectamente en el método a través de la humedad del suelo, especialmente en las unidades sedimentarias. En consecuencia, una recomendación de mejora consiste en incorporar un enfoque temporal que refleje la variación de humedad y temperatura asociada a precipitación y régimen climático. Esta extensión permitiría representar como varía el potencial de captación y entregar resultados más útiles.

7 CONCLUSIONES

En este proyecto se evaluó el potencial geotérmico de baja entalpía a escala regional, generando mapas SIG que entregan la factibilidad para instalar captaciones verticales y horizontales, con foco en el territorio continental, específicamente en la región del Biobío.

La revisión bibliográfica permitió identificar dos metodologías aplicables a los objetivos y a la escala definidos, los métodos seleccionados fueron el método sHE o specific heat exchanger por su respaldo técnico, madurez internacional y compatibilidad con flujos SIG, y el modelo para captaciones horizontales que fue creado por el servicio nacional de geología y minería (SERNAGEOMIN).

La estructuración de los parámetros y variables que condicionan la evaluación del potencial geotérmico somero, tanto para captaciones horizontales como verticales y de variables geológicas e hidrogeológicas relevantes para el comportamiento del subsuelo, resultó esencial para definir adecuadamente los modelos empleados y para comprender cómo cada metodología responde a distintos contextos territoriales. Asimismo, el análisis de la influencia de factores como la litología, el grado de saturación, la estratigrafía y los contrastes térmicos superficiales permitió establecer relaciones directas entre las características del terreno y la capacidad de captación térmica.

Para captaciones horizontales, el potencial estimado a 2 [m] de profundidad muestra una fuerte influencia estacional, con valores que varían durante el año entre $-9,74$ y $13,2 \left[\frac{W}{m^2} \right]$. El intervalo muestra como el desempeño de este modelo depende estrechamente del contraste térmico superficial–subsuperficial y de las propiedades térmicas asignadas al suelo, por lo que los mapas obtenidos deben interpretarse como una referencia espacial inicial más que como un valor de diseño definitivo a escala de proyecto. Aun así, los resultados permiten diferenciar zonas relativas más favorables y constituyen una base útil para orientar decisiones preliminares y priorizar levantamiento de información local.

Para captaciones verticales cerradas, el método sHE entrega un potencial moderado y relativamente homogéneo en gran parte del territorio evaluado, con potencias específicas entre $42,3$ y $90 \left[\frac{W}{m} \right]$. La variabilidad espacial se explica principalmente por diferencias litológicas y

por condiciones de saturación en unidades sedimentarias, lo que refuerza la utilidad del enfoque sHE como herramienta rápida y operativa para estimaciones preliminares, especialmente cuando la información disponible no permite caracterizaciones litoestratigráficas detalladas en profundidad. En conjunto, los resultados de ambos enfoques confirman que es posible construir una primera aproximación regional del recurso geotérmico somero, diferenciando comportamientos esperables según configuración horizontal o vertical.

Las principales limitaciones de este estudio se relacionan con la escasa disponibilidad de información específica sobre las propiedades físicas y térmicas de las distintas litologías y tipos de suelo presentes en Chile, lo que dificulta una adecuada caracterización del subsuelo y afecta la fiabilidad de los modelos de estimación del potencial. Esta falta de datos detallados ha sido abordada mediante recopilación bibliográfica, sin embargo, persiste la necesidad de generar y sistematizar nuevos estudios geológicos, edafológicos e hidrogeológicos a nivel nacional para contar con bases de datos actualizadas y de alta resolución. A ello se suman otras limitaciones, como la obtención insuficiente de información base, la dependencia de valores bibliográficos para parámetros térmicos y la ausencia de validación sistemática en terreno, factores que aumentan la incertidumbre de los resultados. Por lo mismo, se recomienda interpretar los valores obtenidos con cautela y utilizarlos como guía para prefactibilidad y planificación, complementándolos con antecedentes específicos de cada sitio. Como líneas de mejora, resulta fundamental incorporar mediciones directas en terreno, la actualización de la cartografía existente y la integración de variables locales como cobertura vegetal, evapotranspiración u otras condiciones que afectan el balance térmico superficial que no fueron consideradas en esta versión.

La relevancia de estos resultados radica en que contribuyen a reducir la brecha histórica de información sobre geotermia somera en Chile, particularmente en una región con alta demanda térmica y problemas persistentes de contaminación. Debido a su carácter como un estudio único al respecto para la región, aporta una herramienta estratégica para tomadores de decisión, instituciones públicas y desarrolladores interesados en tecnologías de climatización sustentable.

Finalmente, esta memoria entrega una base cartográfica inicial y un procedimiento SIG replicable para aproximar el potencial geotérmico somero de baja entalpía en el Biobío.

8 REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency (2023). *The Future of Geothermal Energy*. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/the-future-of-geothermal-energy>.
- [2] Ruiz C. (2017). *Geothermal Power: Technology Brief. Abu Dhabi*. International Renewable Energy Agency. Recuperado de <https://www.irena.org/Publications/2017/Aug/Geothermal-power-Technology-brief#:~:text=IRENA%20%282017%29%2C%20Geothermal%20Power%3A%20Technology%20Brief%2C%20International%20Renewable,insights%20for%20policy%20makers%20on%20geothermal%20power%20generation>.
- [3] Centro de Energía FCFM, Energy Sector Management Assistance Program, Fundación Chile (2017). *Mesa De Geotermia: Rol de la Geotermia en el Desarrollo de la Matriz Eléctrica de Chile*. Recuperado de: <https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/informe-final-mesa-geotermia.pdf>.
- [4] Ministerio de Energía (2016). *Energía 2050. Política Energética De Chile*. Recuperado de: <https://energia.gob.cl/documentos/energia-2050-politica-energetica-de-chile>.
- [5] Ministerio de Energía Gobierno de Chile (2022). *Agenda De Energía 2022-2026*. Recuperado de: https://Energia.Gob.Cl/Sites/Default/Files/Documentos/Agenda_Energia_2022_-_2026,
- [6] Ministerio de Medio Ambiente Gobierno de Chile (2018). “Decreto 6. Plan De Prevención Y De Descontaminación Atmosférica Para Las Comunas De Concepción Metropolitano”. *Biblioteca del Congreso Nacional*. Recuperado de: https://ppda.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2023/02/Decreto-6_PPDA-Concepcion-Metropolitano.pdf.
- [7] Environmental Systems Research Institute (ESRI) (S.f.), *Requisitos Del Sistema De Arcgis Pro-3.5 Arcgis Pro*. Recuperado de: <https://Pro.Arcgis.Com/Es/Pro-App/Latest/Get-Started/Arcgis-Pro-System-Requirements.Htm>.
- [8] Soto Lavayen K. (2025). *Diseño Y Simulación De Pozos Geotérmicos Para La Optimización De La Extracción De Energía*. Universidad Estatal Península De Santa Elena. Recuperado de: <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/13115>.
- [9] Ministerio De Energía Gobierno de Chile (S.f.). *¿Qué Es La Geotermia?* Recuperado de: <https://Energia.Gob.Cl/Educacion/Que-Es-La-Geotermia>.

- [10] Palacio Villa M.A., Blessent, D., López Sánchez J., y Moreno D. (2020). “Sistemas geotérmicos mejorados: revisión y análisis de casos de estudio”. *Boletín de Geología*. Universidad Industrial de Santander. Vol. 42, 101-118. doi: 10.18273/revbol.v42n1-2020006.
- [11] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Instituto Geológico y Minero de España (2008). *Manual de geotermia*. Gobierno de España. Recuperado De: https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/10952_manual_geotermia_a2008.pdf.
- [12] Ministerio de Energía Gobierno de Chile (S.f.). Aspectos Técnicos Y Económicos - Bombas De Calor Geotérmicas. *Genera tu Propia Energía*. Recuperado de: https://Autoconsumo.Minenergia.Cl/?Page_Id=3310.
- [13] WOLF Deutschland (S.f.). *Funcionamiento De La Bomba De Calor: Por Qué Y Cuándo Conviene*. Recuperado de: <https://www.wolf.eu/es-es/Guia/Funcionamiento-Bomba-De-Calor.Html>.
- [14] Area tecnología (S.f.). *Bomba De Calor*. Recuperado de: <https://areatecnologia.com/calefaccion/bomba-de-calor.html>.
- [15] Cymper (S.f.). *Climatización Geotérmica*. Recuperado de: <https://www.cymper.com/blog/geotermia-li-climatizacion-geotermica/>.
- [16] Climatisation Labelle (S.f.). *Energía Geotérmica*. Recuperado de: <https://www.geothermielabelle.com/>.
- [17] Todo ingenierías (S.f.). *Tipos De Sistemas Geotérmicos Y Su Funcionamiento: Una Guía Completa*. Recuperado de: <https://todoingenierias.com/Tipos-De-Sistemas-Geotermicos-Y-Su-Funcionamiento-Una-Guia-Completa/>, S.f.
- [18] Eco Forest (2025). *Geotermia Profundidad: Mitos, Realidades Y Costes*. Recuperado de: <https://ecoforest.com/es/blog/geotermia-profundidad/>.
- [19] Erkan Systems (S.f.). *Sondas Coaxiales*. Recuperado de: <https://www.erkan-systems.es/Productos/Sondas-Coaxiales/>.
- [20] Heredia González A. (2014). “Análisis de la demanda energética y proyecto de climatización de una instalación geotérmica en una vivienda unifamiliar”. *Archivo Digital UPM*. Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de: <https://oa.upm.es/30442/>.
- [21] Erkan Systems (S.f.). *Sondas Coaxiales*. Recuperado de: <https://www.erkan-systems.es/Productos/Sondas-Coaxiales/>.

- [22] Obras Urbanas (2016). Micropilote Geotérmico Ischebeck Titan; Cimentación Termoactiva Con Intercambiador Coaxial. *Energías Alternativas*. Recuperado de: <https://Obrasurbanas.Es/Micropilote-Geotermico-Ischebeck-Titan-Cimentacion-Termoactiva-Con-Intercambiador-Coaxial/>.
- [23] Climatisation Labelle (S.f). *Energía Geotérmica*. Recuperado de: <https://www.geothermielabelle.com/>.
- [24] Think Geoenergy (S.f). *Producción Y Utilización De Energía Geotérmica: Noticias Y Perspectivas Geotérmicas*. Recuperado de: <https://www.thinkgeoenergy.com/geothermal/geothermal-energy-production-utilisation/>.
- [25] International Renewable Energy Agency (2025). *Renewable Energy Insights Technologies*. Recuperado de: <https://public.tableau.com/app/profile/irena.resource/viz/shared/6TKNWRNT6>.
- [26] Eze M. (2025). Leading Geothermal Energy Producers Worldwide. *The Electricity Hub*. Recuperado de: <https://theelectricityhub.com/leading-geothermal-energy-producers-worldwide/>.
- [27] International Geothermal Association (2023). *Geothermal Energy Database*. Recuperado de: <https://worldgeothermal.org/geothermal-data/geothermal-energy-database>.
- [28] Asociación Chilena de Energía Geotérmica A.G. (2009). *Historia De La Geotermia*. Recuperado de: <http://www.achegeo.cl/historiadelageotermia.html>.
- [29] Ministerio De Energía Gobierno de Chile (2017). *Opera En Chile La Primera Planta Geotérmica De Sudamérica*. Recuperado de: <https://energia.gob.cl/noticias/antofagasta/opera-en-chile-la-primera-planta-geotermica-de-sudamerica>.
- [30] Ministerio De Minería Gobierno de Chile (2024). Ley 19657 Sobre Concesiones De Energía Geotérmica. *Biblioteca del Congreso Nacional*. Recuperado de: <https://bcn.cl/2mu41>.
- [31] Ministerio De Minería Gobierno de Chile (2010). “Azufre Norte 1, Ubicada En La Comuna De Ollagüe, Provincia De El Loa, II Región De Antofagasta, A La Empresa Sociedad Contractual Minera El Abra, En Virtud De La Ley No 19.657”. *Biblioteca del Congreso Nacional*. Recuperado de: <https://bcn.cl/sVHaNu>.
- [32] Ministerio De Minería Gobierno de Chile (2015). “Decreto 32 Aprueba Reglamento Para La Aplicación De La Ley No 19.657. Sobre Concesiones De Exploración Y Explotación De

- Energía Geotérmica”. *Biblioteca del Congreso Nacional*. Recuperado de: <https://Bcn.Cl/5k4hcc>.
- [33] Ministerio De Minería Gobierno de Chile (2013). Decreto 114 Aprueba Nuevo Reglamento Para La Aplicación De La Ley No 19.657, Sobre Concesiones De Energía Geotérmica Y Deroga Decreto No 32, De 2004, Del Ministerio De Minería. *Biblioteca del Congreso Nacional*. Recuperado de: <https://Bcn.Cl/3ne2c>.
- [34] Ministerio De Minería Gobierno de Chile (2024). Ley 21711 Perfecciona La Ley N° 19.657, Sobre Concesiones De Energía Geotérmica, Para El Desarrollo De Proyectos De Aprovechamiento Somero De Energía Geotérmica. *Biblioteca del Congreso Nacional*. Recuperado de: <https://Bcn.Cl/Ckvkkm>.
- [35] Centro de Excelencia Geotérmica de los Andes (2018). *Informe Cega Línea Geotermia Y Sociedad Análisis De Legislación Comparada Sobre Energía Geotérmica*. Universidad de Chile. Recuperado de: <https://1library.Co/Document/Zgrmlr8q-Informe-Geotermia-Sociedad-Analisis-Legislacion-Comparada-Energia-Geotermica.Html>.
- [36] Dirección General de Aguas (2017). *Guía Para La Presentación De Solicitudes De Derechos De Aprovechamiento De Aguas Subterráneas Para Aplicaciones De Uso Directo De Energía Geotérmica*. Ministerio de Energía Gobierno de Chile. Recuperado de: https://energia.gob.cl/sites/default/files/guias_aguas_subterranea.pdf.
- [37] Dirección General de Aguas (2008). *Manual De Normas Y Procedimientos Para La Administración De Recursos Hídricos*. Ministerio de Obras Publicas Gobierno de Chile. Recuperado de: https://dga.mop.gob.cl/uploads/sites/13/2024/06/proced_darh.pdf.
- [38] Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (2022). *Guía Práctica Uso De Geotermia Somera Para Climatización*. Universidad de Chile. Recuperado de: <https://tantaku.cl/wp-content/uploads/2022/11/Guia-practica-uso-de-geotermia-somera-para-climatizacion-1.pdf>.
- [39] Servicio de Evaluación Ambiental (2022). *Guía Para La Descripción De Centrales Geotérmicas De Generación De Energía Eléctrica En El SEIA*. Recuperado de: https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2022/03/09/guia_DP_centrales_geotermicas.pdf.
- [40] Regiones De Chile (S.f.). *Región Del Biobío*. Recuperado de: <https://Regionesdechile.Cl/Region-Del-Biobio/>.

- [41] Centro de Información de Recursos Naturales (1990). *Atlas Agroclimático De Chile: Regiones Iv A Ix*. Biblioteca Digital Instituto Forestal. Recuperado de: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/e8037a30-5afe-4ea1-a12d-ed1b741fa1c5>.
- [42] N. Stolpe (2006). *Descripciones De Los Principales Suelos De La Viii Región De Chile*. Universidad de Concepción. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/341685579_DESCRIPCIONES_DE_LOS_PRINCIPALES_SUELOS_DE_LA_VIII_REGION_DE_CHILE.
- [43] Servicio Nacional de Geología y Minería (2002). *Mapa Geológico De Chile: Versión Digital*. Recuperado de: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/30dc73ad-a260-4212-9e2b-96f0ac15813e>,
- [44] Aqualogy Medioambiente (2013). *Levantamiento Hidrogeológico En Cuencas Pluviales Costeras En La Región Del Libertador General Bernardo O'higgins Y Región Del Biobío*. Ministerio De Obras Públicas. Recuperado de: <https://repositoriodirplan.mop.gob.cl/biblioteca/handle/20.500.12140/25857>.
- [45] Secretaría Ejecutiva de Construcción Sustentable (2018). *Estándares De Construcción Sustentable Para Viviendas De Chile*. Ministerio De Vivienda Y Urbanismo. Vol. 2. Recuperado de: <https://catalogo.minvu.cl/bib/24424>.
- [46] Pediaexpertos (S.f.). *Diferencia Entre Conductividad Térmica Y Difusividad Térmica*. Recuperado de: <https://Pediaexpertos.Com/Diferencia-Entre-Conductividad-Termica-Y-Difusividad-Termica/>.
- [47] Westdary (S.f.). *Concepto De Conductividad Térmica: Ejemplos, ¿Qué Es? Y Para Que Sirve*. Recuperado de: <https://Definicionwiki.Com/Conductividad-Termica-Ejemplos-Que-Es-Para-Que-Sirve/>.
- [48] Coluccio Leskow E. (2025). *Conductividad Térmica - Concepto, Métodos Y Ejemplos*. Editorial Etecé. Recuperado de: <https://Concepto.De/Conductividad-Termica/>.
- [49] Thermal Engineering (S.f.). *¿Qué Es La Difusividad Térmica? Definición*. Recuperado de: <https://Www.Thermal-Engineering.Org/Es/Que-Es-La-Difusividad-Termica-Definicion/>.
- [50] Cengel Y. A., Ghajar A. J. (2004). *Transferencia De Calor Y Masa*. McGraw-Hill. Recuperado de: https://drive.google.com/file/d/1HhKnZmHRp_JhsCkmscnHOYs4s7Z8Dgc1/view.
- [51] Carslaw H. S. (1959). *Conduction Of Heat in Solids*. At The Clarendon Press. Universidad de Oxford. Recuperado de: <http://Archive.Org/Details/Conductionofheat0000hsca> .

- [52] Zenteno Arenas G. (2013). *Modelación Térmica Del Suelo Alrededor De Tubos Enterrados En Sistemas De Colección De Energía Geotérmica De Baja Entalpía*. Recuperado de: <https://Repositorio.Uchile.Cl/Handle/2250/115279>.
- [53] Verein Deutscher Ingenieure (2010). *Thermal Use of The Underground Fundamentals, Approvals, Environmental Aspects, Part 1*. Recuperado de: <https://www.equipmentnorm.com/DIN/177839437/VDI-4640-Part-1#:~:text=The%20VDI%204640%20Part%201%20standard%20serves%20as,the%20approvals%20required%20under%20water%20and%20mining%20legislation>.
- [54] Verein Deutscher Ingenieure (2010). *Thermal Use of The Underground Fundamentals, Approvals, Environmental Aspects, Part 2*.
- [55] Verein Deutscher Ingenieure (2010). *Thermal Use of The Underground Fundamentals, Approvals, Environmental Aspects, Part 2*.
- [56] International Soil Reference and Information Centre (2005). *Soil And Terrain Database (Soter) For Latin America and The Caribbean (Soterlac), Version 2.0*. ISRIC Data Hub. Recuperado de: <https://data.isric.org/geonetwork/srv/api/records/436bd4b0-7ffc-4272-be57-686b7d7eea7d>
- [57] Universidad Bernardo O'Higgins (2010). *IDE Región del Biobío*. Recuperado de: <https://Ide-Biobio-Ubohiggins.Hub.Arcgis.Com/>.
- [58] Luzio Leighton W. (2010). *Suelos De Chile*. Universidad de Chile. Recuperado de: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/182305>.
- [59] Instituto de Investigaciones Agropecuarias (1982). *Determinación De Los Regímenes De Humedad Y Temperatura Para Los Suelos De Chile*. Recuperado de: <https://Biblioteca.Inia.Cl/Server/Api/Core/Bitstreams/95fb00a3-684a-4daf-927b-24d4e8e52d2d/Content>.
- [60] Ministerio de Energía Gobierno de Chile (S.f.). *Api Energías Renovables*. Recuperado de: <https://Api.Minenergia.Cl/>.
- [61] Verein Deutscher Ingenieure (2010). *Thermal Use of The Underground Fundamentals, Approvals, Environmental Aspects, Part 1*. Recuperado de: <https://www.equipmentnorm.com/DIN/177839437/VDI-4640-Part-1#:~:text=The%20VDI%204640%20Part%201%20standard%20serves%20as,the%20approvals%20required%20under%20water%20and%20mining%20legislation>.

- [62] AquaTerra Ingenieros Ltda. (2011). *Estudio Hidrogeológico Cuencas Biobío E Itata. Cuenca Itata. Tomo Iii: Planos*. Ministerio De Obras Públicas. Recuperado de: <https://Repositoriodirplan.Mop.Gob.Cl/Biblioteca/Handle/20.500.12140/25825>.
- [63] AquaTerra Ingenieros Ltda. (2011). *Estudio Hidrogeológico Cuencas Biobío E Itata. Cuenca Itata. Tomo Iv: Informe Final Y Anexos*. Ministerio De Obras Públicas. Recuperado de: <https://Repositoriodirplan.Mop.Gob.Cl/Biblioteca/Handle/20.500.12140/25826>.
- [64] Gormaz Campos H. (2020). *Caracterización Hidrogeológica, Hidrogeoquímica Y Vulnerabilidad De La Cuenca Costera Entre El Río Biobío Y Estero Manco, Región Del Biobío, Chile. Universidad de Concepción*. Recuperado de: <https://Repositorio.Udec.Cl/Handle/11594/6192>.
- [65] Figueroa G. (2020). *Caracterización Hidrogeológica De Talcahuano Entre Los 36°44'-36°49'S Y 73°00'-73°08'W, Región Del Biobío, Chile*. Universidad de Concepción. Recuperado de: <https://repositorio.udec.cl/server/api/core/bitstreams/7ae3933e-9051-40bc-b139-084739ec2190/content>.
- [66] AquaTerra Ingenieros Ltda. (2012). *Estudio Hidrogeológico Cuenca Biobío*. Ministerio De Obras Públicas. Recuperado de: <https://Repositoriodirplan.Mop.Gob.Cl/Biblioteca/Handle/20.500.12140/25811>.
- [67] Instituto Geológico y Minero de España (1985). *Análisis Metodológico De Técnicas Geoquímicas Empleadas En Prospección Geotérmica*. Ministerio de Industria y Energía. Recuperado de: https://Info.Igme.Es/Sidpdf/035000/001/Analisis%20metodologico%20de%20las%20tecnicas%20geoquimicas%20empleadas%20en%20prospeccion%20geotermica/35001_0001.Pdf.
- [68] Melosh G., Cumming W., Benoit D., Wilmarth M., Colvin A., Winick J., Soto-Neira E., Sussman D., Urzúa-Monsalve L., Powell T. y Peret A. (2010). "Exploration Results and Resource Conceptual Model of The Tolhuaca Geothermal Field, Chile." *Proceedings World Geothermal Congress*. Pp. 25-29. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/228522137_Exploration_results_and_resource_conceptual_model_of_the_Tolhuaca_Geothermal_Field_Chile, 2010.
- [69] Polanco Valenzuela E. (2010). *Volcanoestratigrafía, Geoquímica Y Peligro Volcánico Del Volcán Lonquimay (38°30's), Andes Del Sur (Chile)*. Universidad De Barcelona. Recuperado de: <https://diposit.ub.edu/server/api/core/bitstreams/dcf684b8-2f1a-4258-a8ae-0ae3140fe14d/content>.

- [70] TECNOLOGÍA Y RECURSOS DE LA TIERRA S.A., Sanchez Guzmán J., Sanz López L., Ocaña Robles L. (2011). *Evaluación Del Potencial De Energía Geotérmica*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Recuperado de: <https://www.idae.es/publicaciones/evaluacion-del-potencial-de-energia-geotermica>.
- [71] García Droguett D. (2012). *Geoquímica De Las Fuentes Termales Del Volcán Sierra Velluda, VIII Región, Chile*. Universidad de Chile. Recuperado de: https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/111899/cf-garcia_dd.pdf?sequence=1.
- [72] Augusto M., Caselli A., Tassi F., Dos Santos Afonso M., y Vaselli O. (2012). "Seguimiento Geoquímico De Las Aguas Ácidas Del Sistema Volcán Copahue-Río Agrio: Posible Aplicación Para La Identificación De Precursores Eruptivos". *Revista De La Asociación Geológica Argentina*. Vol. 69. Pp. 481-495. Recuperado de: https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-48222012000400001.
- [73] Lizama Delucchi M. (2013). *Alteración Hidrotermal En El Sistema Geotermal Tolhuaca: Caso De Estudio Sondaje Tol-I*. Universidad de Chile. Recuperado de: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/115553>.
- [74] Berrios Guerra C. (2015). *Caracterización Geoquímica De Sistemas Geotermales En Zonas De Transición: Volcanes Nevados De Chillán Y Copahue*. Universidad de Chile. Recuperado de: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/134130>.
- [75] Melosh G., Moore J., y Stacey R. (2012). "Natural Reservoir Evolution in The Tolhuaca Geothermal Field, Southern Chile". *Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Recuperado de: <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2012/Melosh.pdf>, 2012.
- [76] Betancourt Hirmas C. (2016). *Alteración Hidrotermal Asociada Al Complejo Fisural Callaqui: Aporte De La Mineralogía De Arcillas Y Ceolitas, Y De La Geoquímica De Fluidos*. Universidad de Chile. Recuperado de: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/140987>.
- [77] Norambuena Soto J. (2016). *Variaciones Petrográficas Y Geoquímicas De Lavas Recientes Del Volcán Antuco, Región Del Biobío, Chile: Implicancias En La Evolución Del Reservorio Magmático*. Universidad de Chile. Recuperado de: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/143130>.
- [78] Augusto M. y Velez M. (2017). "Avances En El Conocimiento Del Sistema Volcánico-Hidrotermal Del Copahue: A 100 Años Del Trabajo Pionero De Don Pablo Groeber". *Asociación Geológica Argentina*. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

- Universidad de Buenos Aires. Vol. 74. Pp. 109–124. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11336/60270>.
- [79] Martínez P., Singer B., Roa H. y Jicha B. (2018). "Volcanologic And Petrologic Evolution of Antuco-Sierra Velluda, Southern Andes, Chile". *Journal Of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. 349, Pp. 392-408. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.11.026>.
- [80] Alborno Tapia A. (2019). *Estructura Del Basamento Y Su Posible Relación Con La Actividad Holocena Del Volcán Antuco, Región Del Biobío*. Universidad de Concepción. Recuperado de: <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/3456>.
- [81] Alam M., Alloway B., Galaz G. y Rodríguez N. (2019). *La Historia Explosiva Postglacial Del Flanco Oriental Del Volcán Antuco, Región Del Biobío*. Universidad de Atacama. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/335107821_La_historia_explosiva_postglacial_del_flanco_oriental_del_volcan_Antuco_region_del_Biobio.
- [82] Barcelona H., Yagupsky D. y Augusto Y. (2019). "The Layered Model Of The Copahue Geothermal Reservoir, Argentina". *Geothermal Energy*. SpringerOpen. Vol. 7. Art. 7. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40517-019-0124-9>.
- [83] Gallardo Tapia R. (2020). *Evolución Hidrotermal Del Sistema Geotermal Nevados De Chillán*. Universidad de Chile. Recuperado de: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/176239>, 2020.
- [84] Carrasco Vásquez F. (2022). *Caracterización Y Análisis Del Funcionamiento Hidrogeológico De La Barrera De La Laguna De La Laja, Región Del Biobío*. Universidad de Concepción. Recuperado de: <https://repositorio.udec.cl/handle/11594/10066>.
- [85] Ibarra Mendoza C., Vargas Payera S. y Morata Céspedes D. (2022). *Geotermia En Chile: Un Siglo De Historia Para Un Desarrollo Sustentable*. Centro De Excelencia En Geotermia De Los Andes (CEGA). Recuperado de: <https://doi.org/10.34720/nxq1-kp56>.
- [86] Pavez M., Diaz D., Brasse H., Kapinos G., Budach I., Goldberg V., Morata D., y Schill E. (2022). "Shallow And Deep Electric Structures in The Tolhuaca Geothermal System (S. Chile) Investigated by Magnetotellurics". *Remote Sens*. Vol. 14. Pp. 6144. Recuperado de: <https://doi.org/10.3390/rs14236144>.
- [87] Manosalva Rojas L. (2023). *Estudio Geoquímico De Los Fluidos Hidrotermales Del Sistema Geotermal Del Complejo Volcánico Nevados De Chillán (36°46'–36° 54's Y 71°18'–*

- 71°29'o), *Región De Ñuble, Chile*. Universidad de Concepción. Recuperado de: <https://repositorio.udec.cl/server/api/core/bitstreams/fe2bb0b9-850c-43b1-8aa1-607e94f64042/content>.
- [88] Oyarzo-Céspedes I., Morata D., Arancibia G., Mura V., Browning J., López-Contreras C., Crempien J., y Maza S. (2025). "Numerical Modeling of The Nevados De Chillán Fractured Geothermal Reservoir", *Geothermics*, Vol. 125, Pp. 103181. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.103181>.
- [89] Araya D. (2025). Isoterma De Curie En Chile Central: Análisis Del Gradiente Y Flujo Geotérmico En La Zona Continental". *Andean Geology*. Vol. 52. Pp. 268-279. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.5027/andgeov52n2-3720>.
- [90] Lahsen A. (1978). *Características Geoquímicas Y Origen De Las Aguas De Las Termas De Chillan*. Universidad de Chile. Recuperado de: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/25214>
- [91] Lohmar S., Stimac J., Colvin A., González A., Iriarte S., Melosh G., Wilmarth M., y Sussman D. (2012)., "Tolhuaca Volcano (Southern Chile, 38.3°S): New Learnings From Surface Mapping And Geothermal Exploration Wells". *Congreso Geológico Chileno*. Pp. 443-445. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/313142317_Tolhuaca_volcano_Southern_Chile_383S_new_learnings_from_surface_mapping_and_geothermal_exploration_wellshttps://www.researchgate.net/publication/313142317_Tolhuaca_volcano_Southern_Chile_383S_new_learnings_from_surface_mapping_and_geothermal_exploration_wells.
- [92] Ministerio de Medio Ambiente (S.f). *Calculadora – Calefacción Sustentable*. Recuperado de: <https://Calefaccionsustentable.Mma.Gob.Cl/Calculadora/>.
- [93] Albarrán N., Carrasco C., Honores C., Pérez Y., Pizarro S., y Soto E. (2023). *Metodologías De Evaluación De Recursos Geotérmicos De Muy Baja Entalpía Para La Construcción E Implementación De Sistemas De Climatización O Calefacción Con Bombas De Calor Geotérmicas*. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). Recuperado de: https://bc-geotermica.minenergia.cl/downloads/Metodologia_dashboard.pdf.
- [94] Pereira Morales C., Maycotte Morales C., Restrepo B., Mauro F., Calle Montes A., Velarde M., Marín Serna G., Álvarez Mejía M. y Portela Guarín H. (2011). *Edafología 1, 1ra Edición*. Espacio Grafico Comunicaciones S.A. Recuperado de: <https://studylib.es/doc/8868507/edafolog%C3%ADa-1?p=2>.

- [95] Ibáñez J. y Manríquez F. (2011). *Lixisoles (Wrb) - Un Universo Invisible Bajo Nuestros Pies*. Recuperado de: <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2012/05/09/141636>, 2011.
- [96] Ibáñez J. y Manríquez F. (2011). *Gleysoles (Wrb 1998) - Un Universo Invisible Bajo Nuestros Pies*. Recuperado de: <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2011/02/16/138132>.
- [97] Ibáñez J. y Manríquez F. (2011). *Alisoles (Wrb, 1998) - Un Universo Invisible Bajo Nuestros Pies*. Recuperado de: <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/tag/alisoles>.
- [98] Ibáñez J. y Manríquez F. (2011). *Arenosoles (Wrb 1998) (Suelos Arenosos) - Un Universo Invisible Bajo Nuestros Pies*. Recuperado de: <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2011/07/13/139746>.
- [99] Ibáñez J. y Manríquez F. (2011). *Nitisoles (Nitisoles): Uso Y Manejo (Suelos Ferralíticos) - Un Universo Invisible Bajo Nuestros Pies*. Recuperado de: <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2013/03/30/143790>.
- [100] Ibáñez J. y Manríquez F. (2011). *Cambisoles Uso Y Manejo - Un Universo Invisible Bajo Nuestros Pies*. Recuperado de: <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/tag/cambisoles>.
- [101] Lira Gómez C. (2023). *Andosol: Qué Es, Características, Desarrollo, Tipos De Suelo*. Lifeder. Recuperado de: <https://www.lifeder.com/andosol/>.
- [102] Gisbert Blanquer J., Ibáñez Asensio S. y Moreno Ramón H. (S.f.). *Textura De Un Suelo*. Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/a367acbb-fb5f-46ac-90ae-277978ca6faf/content..>

9 ANEXO A: TABLAS

Tabla 9.1 Coberturas de fuentes externas utilizadas en el proyecto.

Cobertura	Descripción	Fuente	Sitio de descarga
SOTERLACv2	Capa que contiene la distribución de los tipos de suelos de toda América Latina y el caribe	ISRIC Data Hub	Soil and Terrain Database (SOTER) for Latin America and the Caribbean (SOTERLAC), version 2.0
COMUNA_C17	Capa que contiene las divisiones comunales de la región del Biobío	IDE BIOBÍO	https://ide-biobio-ubohiggins.hub.arcgis.com/
REGIONES_v1	División Política Administrativa 2023	IDE CHILE	https://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/36391/Divisi%C3%B3n%20Pol%C3%ADtica%20Administrativa%202023
Geología	Capa que contiene la información geológica del país	Tienda digital SERNAGEOMIN	https://tiendadigital.sernageomin.cl/en/basic-geology/864-2002mapa-geologico-de-chile-escala-1-1000000-n-mapa-m61.html
EstacionesNivelesPozos	Capa con información de estaciones de nivel estático de pozos	Mapoteca digital DGA	https://dga.mop.gob.cl/mapotecadigital/
Ubicación de Volcanes	Capa de puntos que contiene la ubicación de los volcanes de Chile	Líneas de Base Publicas MMA	Áreas de Riesgo - Ubicación de Volcanes - Datos Abiertos Líneas de Base Públicas
Datos_de_Pozos	Capa que contiene información hidrogeológica del país	Dirección general de aguas MOP	https://dga.mop.gob.cl/uploads/sites/13/2024/07/Mapa_Hidrogeologico.o.zip

Tabla 9.2 Proyectos geotérmicos de Chile

Empresa	Id	Proyecto	Ubicación	Información
Geotérmica del Norte - GDN	1	Planta geotérmica Cerro pabellón	Ollagüe, Región de Antofagasta	Planta geotérmica de 48 MW Inversión: US\$320 Millones
Transmark Renewables	2	Adobera	Volcán Tolhuaca	Desarrollo de una planta energética. Inversión: US\$11,33 Millones
	3	Cachapoal	Región de O'Higgins	Proyecto en etapa inicial de estudios para instalar una planta energética
Geosolar (Oden energy)	4	Agua caliente y calefacción	Alto Trancura	sd

	5	Casa A.M. con colectores exteriores	sd	sd
	6	Refugio Alto Trancura	sd	sd
GEOTermika	7	Hotel cabañas del lago	Puerto Varas	Sistema de calefacción geotérmica y agua caliente sanitaria para todo el hotel.
	8	Piscicultura Hendrix Genetics	Curarrehue	Calentar agua de proceso para manejo de reproductores con bomba de calor.
	9	Invertec pesquera	Chiloé	Agua caliente para proceso de alevinaje y agua fría para hatching.
	10	Marine Harvest	Río Blanco	Entrega de agua caliente para alevinaje.
	11	Sealand	Callahue	Enfriar agua de proceso con bomba de calor.
	12	Marine Farm	Puyuhuapi	Calentar agua con bomba de calor
	13	Psicultura invermar	Lago Verde	Instalación de 06 equipos geotérmicos para Hatchery y Smoltificación
	14	Colegio San Javier	Pto. Montt	Calefacción mediante bomba de calor.
EE Chile	15	Caja Los Andes	Viña del Mar	Utilización de energía geotérmica para enfriar y generar agua caliente sanitaria (ACS). Mediante un sistema de captación horizontal.
	16	Condominio Frankfurt	Temuco	sd
	17	Santiago College	Santiago	sd
	18	PDI Puerto Montt	Pto. Montt	sd
	19	Colegio alemán	Lautaro	sd
	20	The american school	Pto. Montt	Ampliación de colegio que instala energía geotérmica para calefacción. Inversión: US\$2 Millones
	21	ANASAC	Lautaro	sd
	22	Liceo Llifén	Llifén	sd
	23	Casa Guzman-Clarke	Valdivia	sd
	24	Caja Los Andes	Maipú	sd
	25	Hospital Clínico Universidad Mayor (Clínica redsalud mayor)	Temuco	sd
	26	ACHS Los Ángeles	Los Ángeles	sd
	27	Hospital Regional de Rancagua	Rancagua	sd
	28	ACHS Curicó	Curicó	sd
	29	Hotel y Casino Dreams Valdivia	Valdivia	sd
	30	Mall Portal Osorno	Osorno	sd
	31	Colegio Alemán Puerto Varas	Pto. Varas	sd
	32	INACAP Puerto Montt	Pto. Montt	sd

Ferro-sur	33	Casa Habitación	Temuco	Instalación de bomba de calor para calefacción y ACS.
	34	Hotel Playa Grande Suites	Pucón	Instalación de bomba de calor para calefacción y ACS.
ENATELCO	35	Celulosa Arauco	Arauco	Sistema experimental por bombas de calor geotérmica, calefacción de plantas madre.
	36	Hogar hermanitas de los pobres	Viña del mar	10.000 metros cuadrados calefaccionados por geotermia.
	37	Bombas de calor geotérmicas	Concepción	Bombas de calor geotérmicas para casa de 800 metros cuadrados.
	38	Bombas de calor geotérmicas	Chillán	Bombas de calor geotérmicas para casa de 300 metros cuadrados.
	39	Bombas de calor geotérmicas	Cañete	Instalación de bombas de calor geotérmicas.
	40	Sistema geotérmico	Sd	Instalación de sistema geotérmico de 700 kW térmicos.
ENATIVA	41	Escuela Colonia Rio Sur	Pto. Varas	Instalación de sistema geotérmico abierto de pozos y calefacción por radiadores para escuela rural. Equipos: 1 bomba de calor de 40 KW de potencia térmica. Inversión: CLP\$205.000.000
	42	Escuela Rural Puauchó	San Juan de la Costa	Instalación de sistema geotérmico horizontal cerrado de 4000 metros de tubería de HDPE y calefacción por radiadores. Equipos: 2 Bombas de calor de 30 KW de potencia térmica cada una Inversión: CLP\$210.000.000
	43	Escuela Luis Cruz Martínez	Curacautín	Diseño e Instalación sistema de clima en base a geotermia con bomba de calor agua-agua y fan coil para calefacción y enfriamiento Escuela Pública. Equipo: 2 Bombas de calor de 35 KW de potencia térmica Inversión: \$114.000.000
	44	Camas de Cultivo Invernadero Panamerican	Pichidegua	Instalación sistema geotérmico con bomba de calor para temperado camas de cultivo mediante tuberías de Pex puestas bajo los almácigos de cultivos de plantines. Equipos: 100 KW de potencia térmica en 3 unidades. Inversión: CLP\$85.000.000
	45	Camas de Cultivo Invernadero Andina Flowers	Independencia	Instalación sistema geotérmico con bomba de calor agua-agua y fuente térmica de tranque de regadío para temperado camas de cultivo mediante tuberías de HDPE enterradas junto a las raíces de las plantaciones. Equipos: 30 KW de potencia térmica

				Inversión: CLP\$45.000.000
	46	Escuela Arturo Prat	Puerto cisnes	Edificio de 1 planta de 620 m². Equipos: 2 Bombas de calor de 40 KW de potencia térmica c/u. Inversión: CLP\$114.000.000
	47	Climatización Jardín Infantil Paula Jaraquemada	San José De Maipo	Edificio de 1 planta de 280 m². Equipos: 2 Bombas de calor de 36 KW de potencia térmica c/u. Inversión: CLP\$82.000.000
	48	Educacional Agrícola / Sistema Geotérmico para Climatización	Talagante, Metropolitana	Instalación sistema geotérmico con bomba de calor agua-agua para mantención de temperatura de sustrato a 20°C para invernadero de cultivos aeropónicos. Equipos: 1 bomba de calor de 12 KW de potencia. Inversión: CLP\$15.000.000
	49	climatización de Jardín Infantil	San José de la Mariquina	Climatización de Jardín Infantil Equipos: 2 Bombas de calor de 18 KW de potencia térmica cada una. Inversión: CLP\$198.000.000
CEGA	50	Liceo Granaderos de Putre	Putre	Sistema de climatización con geotermia somera del Internado Granaderos de Putre. Inversión: CLP\$219.000.000
	51	Espacio de uso público en la precordillera de Antofagasta	Calama	Instalación de un sistema de climatización con Bomba de Calor Geotérmica Inversión: CLP\$167.000.000
	52	Posta de Salud Rural	Illahuapi	sd
	53	Reactivación económica y agro energética	Mafil	Construcción de la primera Cámara Plantinera Geotérmica. Inversión: CLP\$116.000.000
	54	Liceo Arturo Prat	Pto. Cisnes	Proyecto para calefacción en base a energía geotérmica de uso directo Inversión: CLP\$350.000.000
	55	Invernadero geotérmico	Panguipulli	sd
	56	Escuela Luis Cruz Martínez	Curacautín	Sistema geotérmico con bomba de calor para calefaccionar recinto educacional. Inversión: CLP\$350.000.000
	57	Invernadero sector productivo	Panguipulli	sd
	58	Liceo Altos del Mackay	Coyhaique	Calefacción mediante bomba de calor geotérmica.
	59	Secador de leña e invernadero geotérmico	Coyhaique	sd
	60	Invernadero geotérmico para la reinserción social	Pto. Aysén	Uso de la geotermia para la calefacción de invernaderos

Tabla 9.3 Categorización de grupos de suelos [94].

Categoría	Descripción	Grupo de Suelo
1. Suelos con gruesos horizontes orgánicos		Histosoles
2. Suelos intensamente influenciados por la acción humana debido a:	Uso agrario intensivo y prolongado	Anthrosoles
	Suelos con artefactos humanos (cerámicas, etc.)	Technosoles
3. Suelos con impedimentos al desarrollo radicular debido a:	Permafrost a escasa profundidad o pedregosos y con hielo	Cryosoles
	Suelos someros o muy pedregosos	Leptosoles
4. Suelos intensamente influenciados por su contenido en agua debido a:	Ciclos de encharcamiento-déficit de agua en arcillas expandibles	Vertisoles
	Suelos en llanuras de inundación y zonas intermareales	Fluvisoles
	Suelos alcalinos	Solonetz
	Suelos enriquecidos en sal a causa de una intensa evaporación	Solonchaks
	Suelos afectados por aguas subterráneas someras	Gleysoles
5. Suelos cuya dinámica se encuentra afectada por la química Fe/Al	Suelos ricos en alófanos o los complejos hierro-humus	Andosoles
	Suelos con eluviación y iluviación	Podzoles
	Acumulación de hierro en condiciones hidromórficas	Plinthosoles
	Suelos con arcillas de baja actividad, fijación de fósforo y fuerte estructura	Nitisoles
	Suelos muy ricos en caolinita y sesquióxidos	Ferralsoles
6. Suelos afectados por el estancamiento de agua	Suelos con una discontinuidad textural abrupta	Planosoles
	Suelos con una discontinuidad estructural o moderadamente textural	Stagnosoles
7. Suelos ricos en material orgánico y bases	Con un horizonte típicamente mólico	Chernozemes
	Suelos en transición a clima húmedo	Kastanozems
	Suelos con horizonte mólico húmedo	Phaeozems
8. Suelos con acumulación de sales poco solubles o sustancias no salinas	Suelos con acumulación de sílice	Durisoles
	Suelos con acumulación de carbonato cálcico	Calcisoles
9. Suelos con enriquecimiento de arcilla en profundidad	Suelos con transición sinuosa (presentan horizontes de lavado y argílicos)	Albeluvisoles
	Suelos con bajo estatus en bases y arcillas de alta actividad	Alisoles
	Suelos con bajo estatus en bases y arcillas de baja actividad	Acrisoles
	Suelos ricos en bases y arcillas de alta actividad	Luvisoles
	Suelos con alto estatus en bases y arcillas de baja actividad	Lixisoles
10. Suelos relativamente jóvenes o sin desarrollo de horizontes	Suelos con un horizonte superficial ácido y oscuro (Rico en Carbono)	Umbrisoles
	Suelos Arenosos	Arenosoles
	Suelos medianamente desarrollados	Cambisoles

	Suelos sin un desarrollo significativo del perfil edáfico	Regosoles
--	---	-----------

Tabla 9.4 Clasificación textural según tipo de suelo usado en el proyecto. Fuente [95 -101].

Código	Tipo de Suelo	Textura Predominante
ALh	Alisol húmico	Franco arcillosa
ARh	Arenosol húmico	Arenosa
NTu	Nitisol úmbrico	Franca
CMd	Cambisol dístico	Franco arcillosa
FLe	Fluvisol éutrico	Franco arenosa
Gle	Gleysol éutrico	Franco arcillosa
LVx	Luvisol xérico	Franco arcillosa
Anu	Andosol úmbrico	Franco Arenosa
Anz	Andosol albico	Franco Arenosa
Alf	Alisol férrico	Franco arcillosa

Tabla 9.5 Clasificación textural según composición. Fuente [102].

Textura	Condiciones de clasificación
Arcillosa	Arcilla ≥ 40
	Limo < 40 %
	Arena < 45 %
Areno-arcillosa	Arcilla ≥ 35 %
	Arena ≥ 45 %
Franco-arcillosa	Arcilla = 27 a 40 %
	Arena = 20 a 45 %
Limo-arcillosa	Arcilla ≥ 40 %
	Limo ≥ 40 %
Franco-limo-arcillosa	Arcilla = 27 a 40 %
	Arena < 20 %
Franco-arena-arcillosa	Arcilla = 20 a 35 %
	Limo < 28 %
	Arena ≥ 45 %
Franca	Arcilla = 7 a 27 %
	Limo = 28 a 50 %
	Arena < 52 %
Franco-limosa	Sí Arcilla < 12 %
	Limo = 50 a 80 %
	Sí Arcilla = 12 a 27 %
Limosa	Arcilla < 12 %
	Limo ≥ 80 %
Franco-arenosa	Arcilla ≤ 20 %

	$\text{Limo} + (2.0 \times \text{Arcilla}) > 30 \%$
	$\text{Arena} \geq 52 \%$
Arenosa-franca	$\text{SÍ Limo} + (1.5 \times \text{Arcilla}) \geq 15 \%$
	$\text{Arena} = 85 \text{ a } 90 \%$
Arenosa	$\text{Arcilla} < 7 \%$ $\text{Limo} < 50 \%$ $\text{Arena} = 43 \text{ a } 52 \%$
	o
	$\text{Limo} + (1.5 \times \text{Arcilla}) \leq 15 \%$ $\text{Arena} \geq 85 \%$

Tabla 10.1 Ejemplos de conductividad térmica y capacidad calorífica específica relacionada con el volumen del subsuelo. Fuente [61]

	Type of rock		Thermal conductivity $\frac{W}{m \cdot K}$		Volume-related specific heat capacity $\rho \cdot C_p$ $\frac{MJ}{m^3 \cdot K}$	Density $10^3 \cdot \frac{kg}{m^3}$
				Recommended value		
Unconsolidated	clay/silt, dry		0,4–1,0	0,5	1,5–1,6	1,8–2,0
	clay/silt, water-saturated		1,1–3,1	1,8	2,0–2,8	2,0–2,2
	sand, dry		0,3–0,9	0,4	1,3–1,6	1,8–2,2
	sand, moist		1,0–1,9	1,4	1,6–2,2	1,9–2,2
	sand, water-saturated		2,0–3,0	2,4	2,2–2,8	1,9–2,3
	gravel/stones, dry		0,4–0,9	0,4	1,3–1,6	1,8–2,2
	gravel/stones, water-saturated		1,6–2,5	1,8	2,2–2,6	1,9–2,3
	till/loam		1,1–2,9	2,4	1,5–2,5	1,8–2,3
	peat, soft lignite		0,2–0,7	0,4	0,5–3,8	0,5–1,1
Sedimentary rock	clay/silt stone		1,1–3,4	2,2	2,1–2,4	2,4–2,6
	sandstone		1,9–4,6	2,8	1,8–2,6	2,2–2,7
	conglomerate/breccia		1,3–5,1	2,3	1,8–2,6	2,2–2,7
	marlstone		1,8–2,9	2,3	2,2–2,3	2,3–2,6
	limestone		2,0–3,9	2,7	2,1–2,4	2,4–2,7
	dolomitic rock		3,0–5,0	3,5	2,1–2,4	2,4–2,7
	sulphate rock (anhydrite)		1,5–7,7	4,1	2,0	2,8–3,0
	sulphate rock (gypsum)		1,3–2,8	1,6	2,0	2,2–2,4
	chloride rock (rock salt, potash)		3,6–6,1	5,4	1,2	2,1–2,2
	anthracite		0,3–0,6	0,4	1,3–1,8	1,3–1,6
Magmatic rock	tuff		1,1	1,1		
	vulcanite, acid to intermediate	e, g, rhyolite, trachyte	3,1–3,4	3,3	2,1	2,6
		e, g, latite, dacite	2,0–2,9	2,6	2,9	2,9–3,0
	vulcanite, alkaline to ultra-alkaline	e, g, andesite, basalt	1,3–2,3	1,7	2,3–2,6	2,6–3,2
	plutonite, acid to intermediate	granite	2,1–4,1	3,2	2,1–3,0	2,4–3,0
		syenite	1,7–3,5	2,6	2,4	2,5–3,0
	plutonite, alkaline to ultra-alkaline	diorite	2,0–2,9	2,5	2,9	2,9–3,0
		gabbro	1,7–2,9	2,0	2,6	2,8–3,1
Metamorphic rock	slightly metamorphic	clay shale	1,5–2,6	2,1	2,2–2,5	2,4–2,7
		chert	4,5–5,0	4,5	2,2	2,5–2,7
	moderately to highly metamorphic	marble	2,1–3,1	2,5	2,0	2,5–2,8
		quartzite	5,0–6,0	5,5	2,1	2,5–2,7
		mica schist	1,5–3,1	2,2	2,2–2,4	2,4–2,7

Other materials		gneiss	1,9–4,0	2,9	1,8–2,4	2,4–2,7
		amphibolite	2,1–3,6	2,9	2,0–2,3	2,6–2,9
	bentonite		0,5–0,8	0,6	~3,9	
	concrete		0,9–2,0	1,6	~1,8	~2,0
	ice (–10 °C)		2,32		1,87	0,919
	synthetics (HD-PE)		0,42		1,8	0,96
	air (0 °C to 20 °C)		0,02		0,0012	0,0012
	steel		60		3,12	7,8
	water (+10 °C)		0,59		4,15	0,999

Tabla 10,2 Valores de extracción específicos para sondas intercambiadoras, Fuente VDI 4640, parte 2

Underground	Specific heat extraction [W/m]	
	for 1800 h	for 2400 h
General guideline values:		
Poor underground (dry sediment) ($l < 1,5 \text{ W/ (m} \cdot \text{K)}$)	25	20
Normal rocky underground and water saturated sediment ($l < 1,5\text{--}3,0 \text{ W/ (m} \cdot \text{K)}$)	60	50
Consolidated rock with high thermal conductivity ($l > 3,0$)	84	70
Individual rocks:		
Gravel, sand, dry	< 25	< 20
Gravel, sand, saturated water	65–80	55–65
For strong groundwater flow in gravel and sand, for individual systems	80–100	80–100
Clay, loam, damp	35–50	30–40
Limestone (massif)	55–70	45–60
Sandstone	65–80	55–65
Siliceous magmatite (e, g, granite)	65–85	55–70
Basic magmatite (e, g, basalt)	40–65	35–55
Gneiss	70–85	60–70

Tabla 10,3 Valores sHE asignados a secuencias geológicas de la región del Biobío, Fuente Elaboración propia

Secuencia geológica	Clasificación	Valor sHE [W/m]
Cpg	Granito	62,5
DC4	Areniscas	60
E1c	Areniscas	60
E1m	Areniscas	60
Jig	Magmática silícea	62,5
Ks1m	Areniscas	60
KT2	Areniscas	60
M1m	Areniscas	60
M3i	Magmática Intermedia	55

Mg	Magmática silícea	62,5
Mimg	Magmática silícea	62,5
OM1m	Areniscas	60
OM2c	Magmático básico	45
OM3b	Magmático básico	45
MP1m	Areniscas	60
PE1	Areniscas	60
Pl1m	Areniscas	60
Pl3	Magmático intermedio	55
Pl3t	Magmático Intermedio	55
PPl3	Magmático básico	45
Pz4b	Metamorfismo de bajo grado	60
Tr1c	Areniscas	60
PzTr4a	Neis	65
Pz4a	Metamorfismo de Alto grado	65
Q3i	Magmático básico	45
Qm	sedimentos	Seco: 15 Saturado: 60
Q1	sedimentos	Seco: 15 Saturado: 60
Qf	sedimentos	90
Q3av	sedimentos	Seco: 20 Saturado: 60

11 ANEXOS C: DESARROLLO MATEMÁTICO DEL MODELO DE CONDUCCIÓN DE CALOR

Definición matemática de Conducción de calor [51]

La *Teoría Matemática de la Conducción del Calor* puede basarse en una hipótesis sugerida por un experimento descrito como una placa de algún sólido cualquiera, delimitada por dos planos paralelos de una extensión que, en la medida en que puntos estén situados en el centro de los planos estas superficies delimitadoras pueden suponerse infinitas,

Considerando el sólido rodeado por un cilindro imaginario de sección transversal S cuyo eje es normal a la superficie de una placa plana, Este cilindro está bien centrado en la placa, por lo que no hay flujo de calor a través de sus líneas generatrices, Sea la temperatura de la superficie inferior $v_0^{\circ}\text{C}$ y de la superior $v_1^{\circ}\text{C}$ ($v_0 > v_1$), y sea el espesor de la placa de “ d ” centímetros,

Los resultados de experimentos realizados sobre diferentes sólidos bajo la descripción anterior sugieren que, cuando se ha alcanzado el estado estacionario de temperatura, la cantidad “ Q ” de calor que fluye hacia arriba a través de la placa en “ t ” segundos sobre la superficie “ S ” es igual a:

$$Q = \frac{K \cdot (v_0 - v_1) \cdot S \cdot t}{d} \quad (9)$$

Donde:

- **K:** Constante llamada Conductividad Térmica del material, que depende, en efecto del material del que está hecha, En otras palabras, el flujo de calor entre estas dos superficies es proporcional a la diferencia de temperatura de las superficies,
- **v_0 :** temperatura de la superficie inferior
- **v_1 :** temperatura de la superficie superior
- **d :** grosor de la capa

Conducción de calor en un medio isotrópico

Se considerará únicamente medios isotrópicos, es decir, medios cuya estructura y propiedades en el entorno de cualquier punto son las mismas en todas las direcciones desde ese punto,

La relación entre la tasa de cambio de temperatura a lo largo de la normal de una isoterma (las isotermas son planos paralelos a las caras de la placa) y el vector de flujo en esa dirección puede deducirse del experimento descrito anteriormente, Ahora, suponer que las isotermas para las temperaturas v y $v + \delta v$ están separadas por una distancia δx ,

Luego, a partir de la Ecuación (b,1) la tasa en la que el calor se transmite por unidad de tiempo, por unidad de área en la dirección x es:

$$-K \frac{\partial v}{\partial x} \quad (b,2)$$

Se aplica el límite de $\delta x \rightarrow 0$ y resulta en el vector de transmisión de calor en el eje X

$$f_x = -K \frac{\partial v}{\partial x} \quad (b,3)$$

Al extenderse a cualquier superficie isothermal, esto es la “*Hipótesis fundamental de la teoría matemática de conducción de calor*” donde la tasa en la que el calor cruza desde dentro hacia afuera de una superficie isothermal por unidad de área por unidad de tiempo en un punto,

$$-K \frac{\partial v}{\partial n} \quad (b,4)$$

Donde:

- $\frac{\partial}{\partial n}$: cambio de temperatura en dirección normal a la superficie

Si se alinea esta superficie con alguno de los ejes, esta dirección normal es simplemente el eje correspondiente, Entonces, si en vez de utilizar la Ecuación (b,2) para cualquier dirección, se usa para adaptarla a las derivadas parciales en los ejes X , Y y Z ,

$$f_x = -K \frac{\partial v}{\partial x} \quad (b,5)$$

$$f_y = -K \frac{\partial v}{\partial y} \quad (b,6)$$

$$f_z = -K \frac{\partial v}{\partial z} \quad (b,7)$$

Ecuación diferencial de conducción de calor en un sólido isotrópico

Se introduce definiendo un paralelepípedo rectangular a través del cual fluye, pero no genera calor, donde la temperatura v en un punto es función de X , Y , Z y t , considerando lo anterior y que este sólido no necesita ser homogéneo ni isotrópico, se puede llegar a la ecuación de continuidad para hidrodinámica:

$$\rho \cdot c \frac{\partial v}{\partial t} + \left(\frac{\partial f_x}{\partial x} + \frac{\partial f_y}{\partial y} + \frac{\partial f_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (10)$$

Ecuación diferencial de conducción de calor en un medio en movimiento

Considerando ahora un medio solido moviéndose a una velocidad cuyos componentes son u_x , u_y , u_z , Cuando se calcula la tasa a la que el calor cruza cualquier plano, debe ser agregado un término convectivo $(\rho \cdot c \cdot v \cdot u_x)$, $(\rho \cdot c \cdot v \cdot u_y)$ y $(\rho \cdot c \cdot v \cdot u_z)$ a las Ecuaciones (b,5), (b,6) y (b,7) entonces los componentes del flujo de calor en los ejes son ahora:

$$f_x = -K \frac{\partial v}{\partial x} + \rho \cdot c \cdot v \cdot u_x \quad (11)$$

$$f_y = -K \frac{\partial v}{\partial y} + \rho \cdot c \cdot v \cdot u_y \quad (12)$$

$$f_z = -K \frac{\partial v}{\partial z} + \rho \cdot c \cdot v \cdot u_z \quad (b,11)$$

Donde:

- **K:** Conductividad térmica,
- **ρ :** Densidad,
- **c:** Calor específico del material,
- **v:** Temperatura promedio,

Reemplazando esto en la ecuación diferencial de conducción de calor en un medio isotrópico (*Ecuación (b,8)*),

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u_x \frac{\partial v}{\partial x} + u_y \frac{\partial v}{\partial y} + u_z \frac{\partial v}{\partial z} - k \cdot \nabla^2 \cdot v = 0 \quad (13)$$

Y luego de definir nuevos parámetros como fuerza por unidad de masa U , tensores de esfuerzos, presión hidrostática, coeficiente de viscosidad, es decir, relación entre tensiones y deformaciones del medio, la aplicación de la primera ley de la termodinámica y la ecuación del movimiento se obtiene finalmente la ecuación diferencial de conducción de calor en un medio en movimiento,

$$\rho \frac{DU}{Dt} = -P \cdot e_{ii} + 2\mu \cdot \left(e_{ij} \cdot e_{ij} - \frac{1}{3} \cdot e_{ii}^2 \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot \left(K \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (b,13)$$

Ahora, esta ecuación está escrita para el sistema de coordenadas ortogonal y en este proyecto debe aplicarse esta ecuación en coordenadas cilíndricas por lo que se debe cambiar el sistema de coordenadas donde $(x = r \cdot \cos(\theta))$ e $(y = r \cdot \sin(\theta))$,

Por lo tanto, la ecuación para v se convierte en:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{k}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right) \right] \quad (b,14)$$

Que también puede reescribirse como:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (b,15)$$

Conducción de calor en un cilindro circular infinito

Si se calienta un cilindro circular cuyo eje coincide con el eje Z y sus condiciones iniciales y de frontera son independientes de las coordenadas θ y Z , la temperatura será una función de r y t únicamente, la *Ecuación (b,15)* se reduce a:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} \right) \quad (b,16)$$

Donde:

- α : Difusividad térmica,
- v : Temperatura,
- r : Radio del cilindro,
- t : Tiempo,

Ahora bien, Intentar hacer un modelo con esta ecuación, presenta grandes desafíos producto de la complejidad matemática que representa y la incertidumbre de los parámetros físicos involucrados, Por lo que, para poder reducir la dificultad de trabajar con esta ecuación diferencial se procederá a resolver numéricamente mediante un método numérico computacional,

Generación de ecuación de modelo

En otro trabajo [52] se modela en el intercambio térmico entre el suelo y un fluido moviéndose a través de tuberías considerando, además de las propiedades térmicas de las tuberías, una nueva variable, la resistencia térmica del suelo para tener en cuenta como se conduce el calor a través del suelo para llegar a las tuberías, ya que es ignorada en muchos otros estudios asumiendo que la temperatura de la pared externa de las tuberías es igual a la temperatura del suelo sin perturbación, lo cual es importante ya que producto de la baja capacidad del suelo para conducir calor, tiene un efecto importante en la transferencia de calor y no considerarlo puede llevar a sobreestimaciones de la capacidad de recolección de calor del sistema colector,

El proyecto utiliza el Software EUREQA, el cual funciona utilizando algoritmos avanzados para determinar ecuaciones matemáticas que describan un conjunto de datos en su forma más simple, Este tipo de tareas se les conoce como regresión simbólica,

En este caso, el software se utiliza como base la Ecuación (18) para encontrar una conductancia $h(K, \frac{K}{C_v}, R, \Delta t, \Delta T)$ del suelo que dependa de la conductividad K en $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$, difusividad α en $\left[\frac{m^2}{s}\right]$, el radio de las tuberías R en [cm], el tiempo Δt en días y la temperatura ΔT en °C, Resultando en una conductancia promedio,

$$h = \frac{6,889 \cdot k \cdot \Delta t^{0,14}}{R^{0,696} \cdot \alpha^{0,109}} \quad (b,17)$$

Luego, según las simulaciones realizadas en el estudio, el calor transferido entre el suelo y las tuberías sigue un comportamiento lineal con la diferencia de temperatura, por lo que el fenómeno de transferencia de calor puede ser representado a través de la ley de enfriamiento de newton,

$$q = h \cdot \Delta T \quad (b,18)$$

Donde:

- **q:** Flujo de calor en $\left[\frac{W}{m^2}\right]$,
- **h:** Conductancia térmica efectiva del suelo $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$,
- **T:** diferencia de temperatura entre un cuerpo y su entorno [°C],

Así, teniendo en cuenta el resultado del estudio, indicado en la Ecuación (b,17) y reemplazándolo en la Ecuación (b,18) se obtiene:

$$Q = \frac{6,889 \cdot K \cdot \Delta t^{0,14}}{\alpha^{0,109} \cdot R^{0,696}} * \Delta T \quad (b,19)$$

Donde:

- **Q:** Flujo de calor por unidad de superficie $\left[\frac{W}{m^2}\right]$,
- **ΔT:** Diferencia de temperatura entre la cota de las tuberías y la superficie [°C],
- **R:** radio de las tuberías [m],

- Δt : tiempo de uso [s],
- A : Difusividad térmica $\left[\frac{m^2}{s}\right]$,
- K : Conductividad térmica $\left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right]$,

Para reducir el modelo y estandarizar los cálculos se usan valores estándar en la construcción de sistemas geotérmicos superficiales para la definición de la geometría de las tuberías y el tiempo de uso del sistema,

- **Radio de las tuberías (R):** Este es un parámetro que es directamente proporcional al calor que entrega el sistema de climatización, pero inversamente proporcional al flujo, es decir, reduce la eficiencia del flujo del calor, A partir de esto, se considerará un valor intermedio dentro del rango de valores típicamente utilizados para estos sistemas, que es 7,5 [cm],
- **Tiempo de uso (t):** La norma VDI 4640 [53] [54] define un tiempo de uso para el cual los valores de las propiedades térmicas del sedimento o roca son válidos, este tiempo se define en 2,400 [h] que equivale a 3 meses,

Finalmente, al aplicar en la Ecuación (b,19) los datos que definidos anteriormente se obtiene una ecuación reducida que solo depende de las variables correspondientes a la ubicación geográfica, generando un modelo para calcular el potencial geotérmico superficial para captaciones horizontales:

$$Q = \frac{0,287 \cdot K}{\alpha^{0,109}} \cdot \Delta T \quad (b,2014)$$

Donde:

- K : Conductividad térmica del material $\left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right]$,
- α : Difusividad Térmica $\left[\frac{m^2}{s}\right]$,
- ΔT : diferencia de temperaturas entre las tuberías y la atmosfera [$^\circ C$],

Como se menciona aquí la diferencia de temperaturas hace referencia a como es afectada la transferencia de calor producto de la cercanía del sistema con la superficie utilizando como cotas de referencia la profundidad a la que se instalarían las tuberías, a 2 metros bajo el terreno y la altura estandarizada para medir temperatura ambiental que son 2 metros sobre la superficie,

12 ANEXOS D: ESQUEMAS

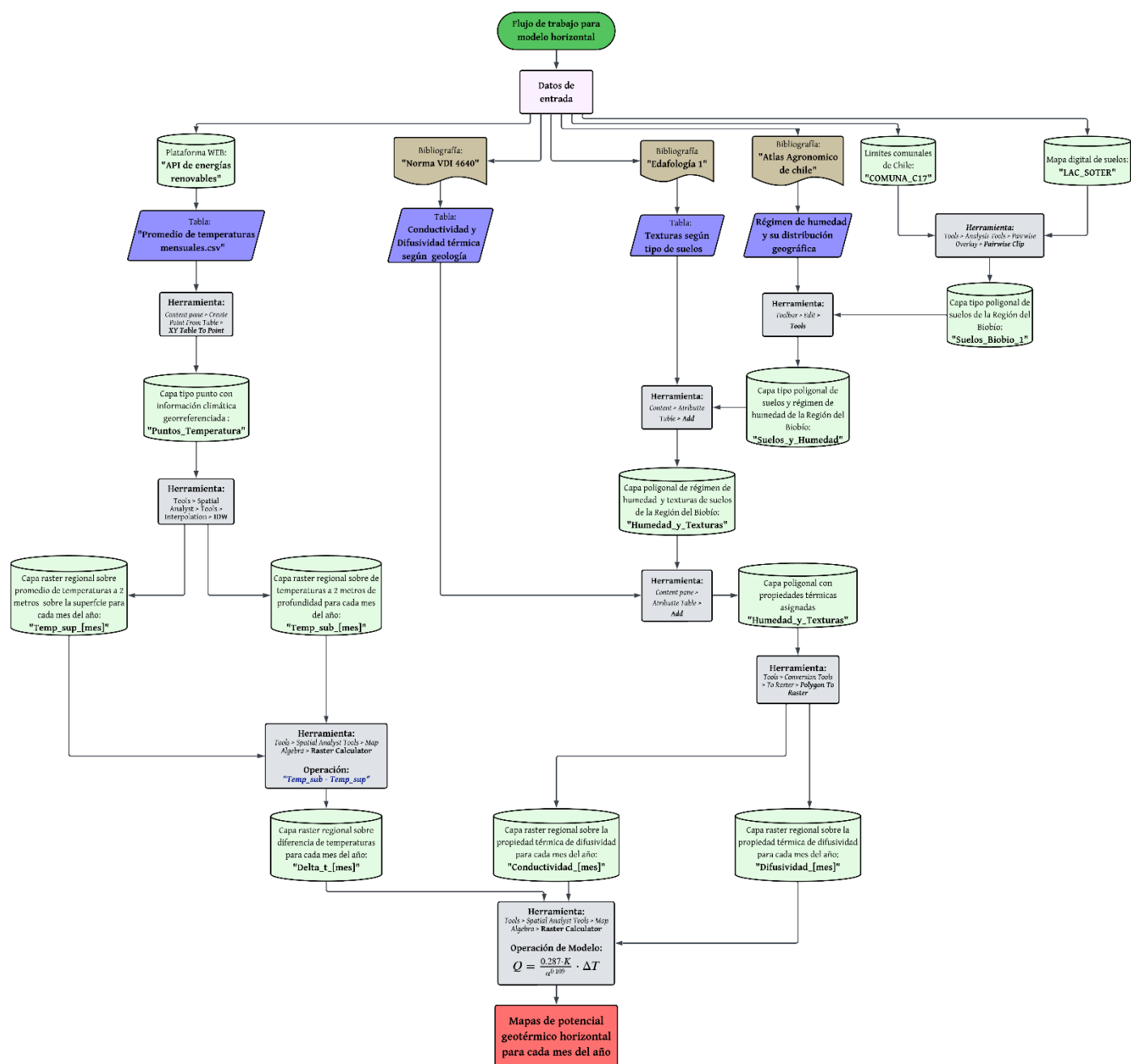


Figura 12.1 Procesamiento de la información, método de captaciones horizontales.

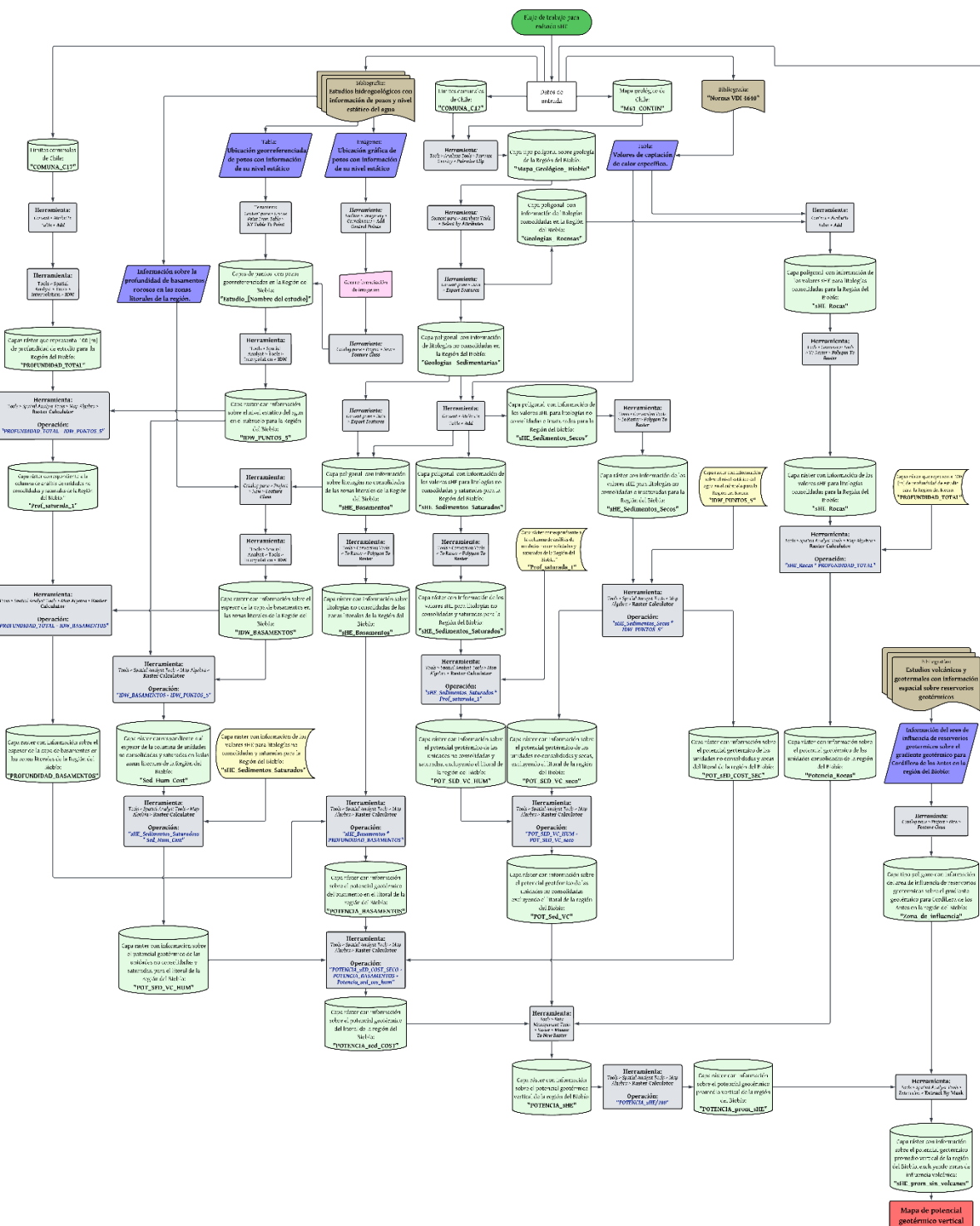


Figura 12.2 Esquema de procedimiento por método sHE para captaciones verticales.

13 ANEXOS E: MAPAS

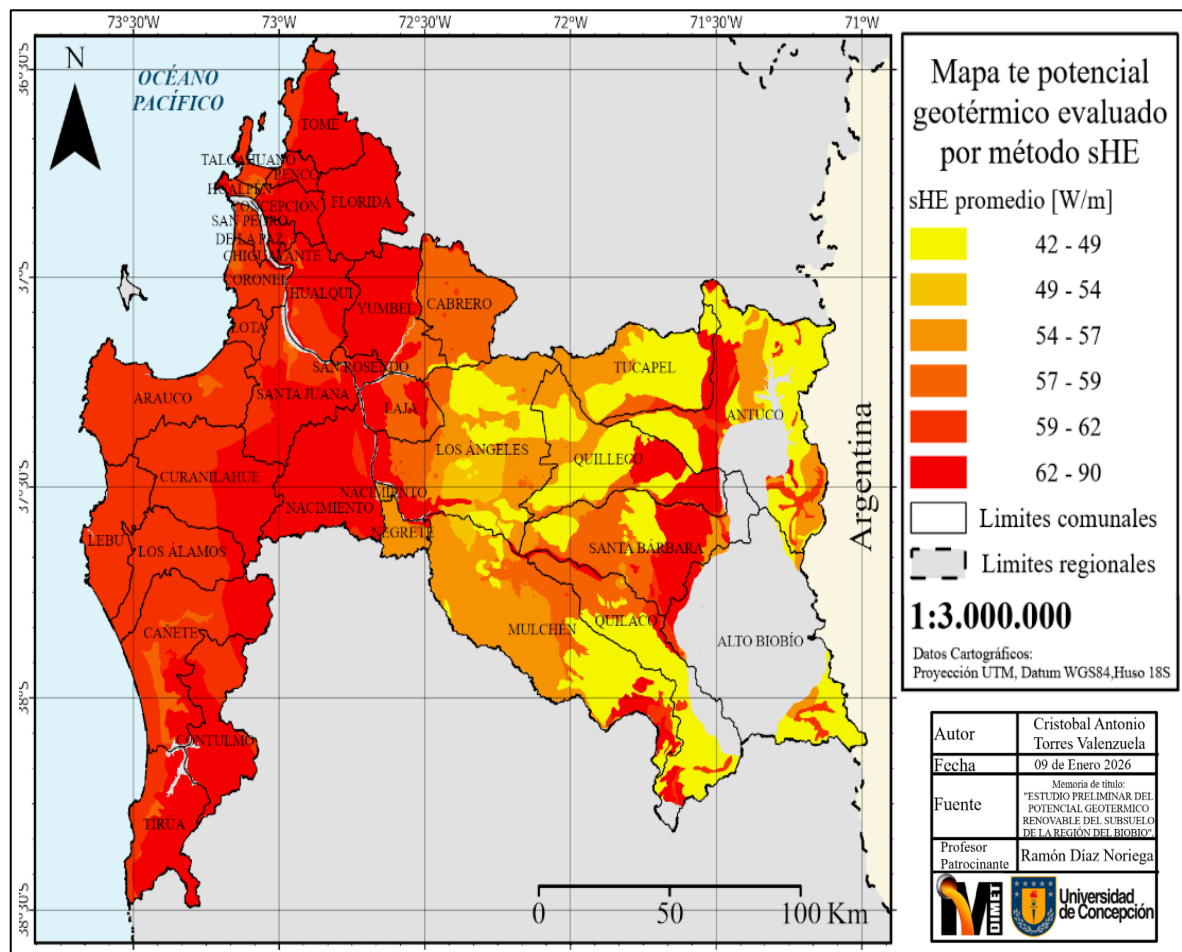


Figura 13.1 Mapa de potencial geotérmico calculado con el método sHE. Fuente Elaboración propia.

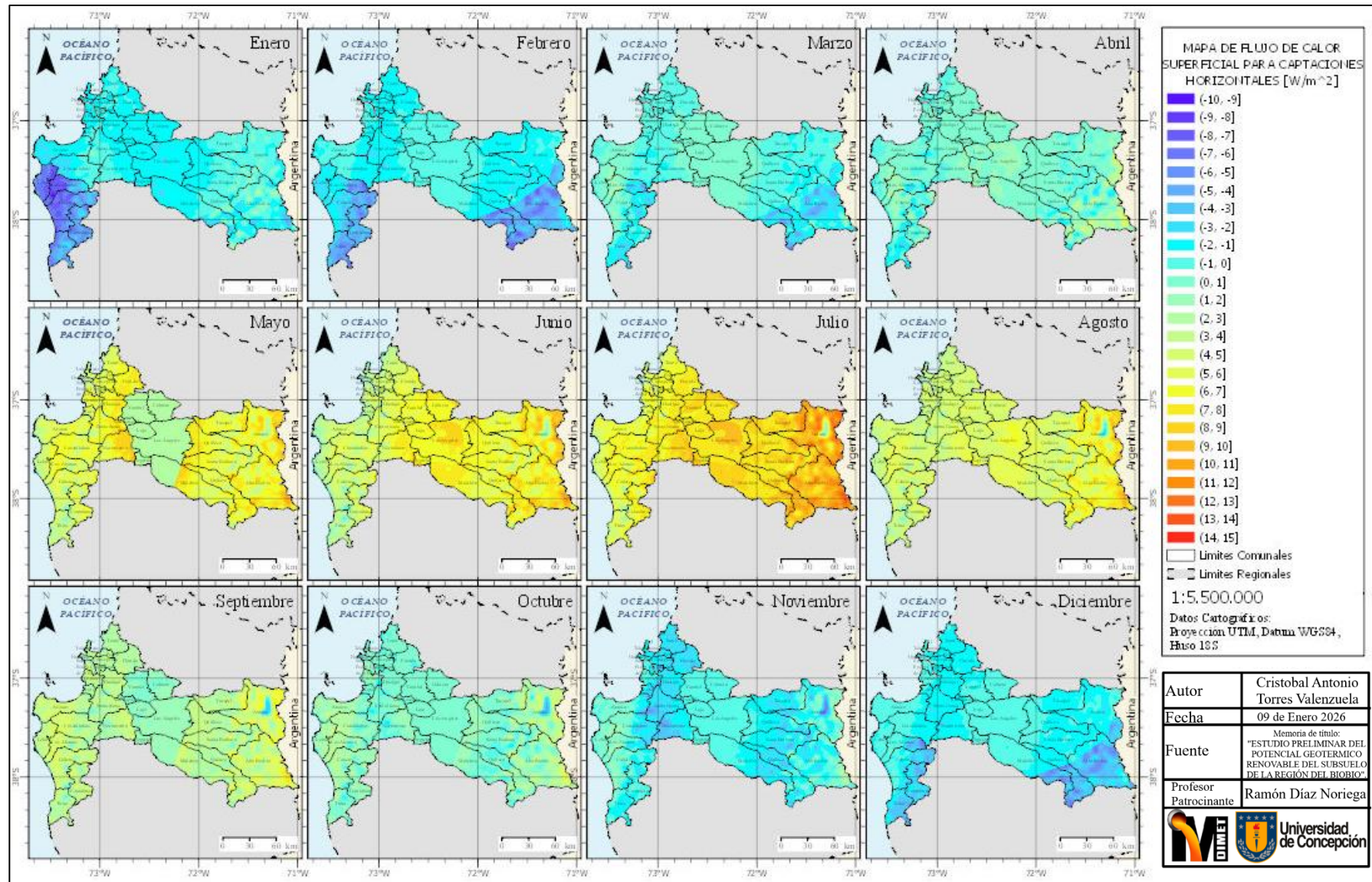


Figura 13.2 Mapa de potencial geotérmico superficial para captaciones horizontales para cada mes del año, Fuente Elaboración propia.

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

Título: ESTUDIO PRELIMINAR DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO RENOVABLE DEL SUBSUELO DE LA REGIÓN DEL BIOBÍO		
Nombre Memorista: CRISTÓBAL ANTONIO TORRES VALENZUELA		
Modalidad	Investigación	Profesor (es) Patrocinante (s)
Concepto	Excelente	 Prof. Ramón Díaz N.
Calificación	6,9	
Fecha	31-03-2026	
 Prof. Ramón Díaz N.		Ingeniero Supervisor:
		Institución: Universidad De Concepción
Comisión (Nombre y Firma)		
 Prof. Roberto Gómez E.		 Prof. Roberto Fustos T.
Resumen		
El trabajo desarrolla la evaluación del potencial geotérmico renovable de baja entalpía en el subsuelo de la Región del Biobío. El objetivo principal es construir una línea base regional que permita identificar, de forma preliminar, la factibilidad para el aprovechamiento térmico del recurso mediante sistemas geotérmicos someros, aportando valores referenciales de potencia de captación y estableciendo limitaciones e incertidumbres propias de un estudio a escala regional. La metodología se basa en la implementación de dos enfoques de cálculo integrados en el software ArcGIS. El método sHE (sondas geotérmicas verticales cerradas) y el método de captaciones horizontales (colectores someros). El estudio se sustenta exclusivamente en datos de dominio público y supuestos bibliográficos, utilizando cartografía a escala como mapas geológicos de SERNAGEOMIN, edafológicos de SOTERLAC y balances hídricos, priorizando la reproducibilidad de los resultados. Los resultados se presentan mediante mapas temáticos y estadísticas descriptivas que permiten comparar el comportamiento espacial del recurso para configuraciones verticales y horizontales. Para el método sHE, siguiendo		

valores tabulados y condiciones de saturación/litología, las potencias específicas de captación estimadas varían entre 42,3 y 90 [W/m], con un promedio regional de 59 [W/m]. En el caso de las captaciones horizontales, mediante una formulación reducida basada en la conductividad térmica (k) y la difusividad térmica (α), se obtuvo un rango de valores de potencial geotérmico superficial para instalaciones a 2 [m] de profundidad entre -9,74 y 13,2 [W/m²], siendo los valores positivos aquellos en que el suelo aporta calor al sistema, útil para calefacción, y los valores negativos indican cuando el suelo extrae calor del sistema.