



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA CON INTERCAMBIADORES DE CALOR  
VERTICALES CERRADOS EN COYHAIQUE**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN  
CIENCIAS MENCIÓN GEOLOGÍA

**MAURICIO ERNESTO MUÑOZ MORALES**

**PROFESOR GUÍA**

Dr. DIEGO MORATA CÉSPEDES

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN**

Dra. DOLORINDA DANIELE

Dra. SASKIA MARÍA ROELS

Este trabajo ha sido financiado por el Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (FONDAP/CONICYT N°15090013) en el marco del proyecto “Estimación y valorización del potencial geotérmico de Aysén” (Gobierno Regional de Aysén, Proyecto BIP 30346723-0)

SANTIAGO DE CHILE

2018

**Resumen de la tesis para optar al grado de:**  
Magíster en Ciencias, mención Geología  
**Por:** Mauricio Muñoz Morales  
**Fecha:** enero 2018  
**Profesor guía:** Dr. Diego Morata Céspedes

## **BOMBA DE CALOR GEOTÉRMICA CON INTERCAMBIADORES DE CALOR VERTICALES CERRADOS EN COYHAIQUE**

La ciudad de Coyhaique tiene serios problemas de contaminación ambiental, debido a la combustión de leña para calefacción. Este problema es crítico durante los meses de otoño e invierno, por lo que la ciudad fue declarada zona saturada por material particulado respirable MP10 debido a la concentración diaria y anual.

Este trabajo propone utilizar bombas de calor geotérmicas para reemplazar el uso de leña y así contribuir a descontaminar la ciudad. Con este propósito se analiza el funcionamiento de una bomba de calor geotérmica, con intercambiadores de calor verticales cerrados, para climatizar el edificio del Gobierno Regional de Aysén y entonces predecir la sustentabilidad técnica y económica de implementar esta tecnología en edificios de características similares.

Para predecir la sustentabilidad técnica, se modela el funcionamiento de una bomba de calor geotérmica con intercambiadores de calor verticales cerrados durante 25 años, considerando el requerimiento energético del edificio, la geometría de las unidades geológicas en profundidad, así como sus propiedades hidráulicas y térmicas, además de la circulación de agua subterránea. El modelo de transferencia de calor entre los intercambiadores de calor verticales cerrados y el subsuelo, así como el modelo de flujo de agua subterránea fueron realizados con software FEFLOW desarrollado por DHI.

En el caso del edificio del Gobierno Regional de Aysén, el sistema de climatización geotérmico requiere 8 intercambiadores de calor verticales cerrados dobles, de 90m de profundidad, para entregar calefacción y refrigeración con un factor de planta de 11,2% en modo calefacción y 5,4% en modo refrigeración. Es importante calentar y refrigerar con el sistema de climatización, para renovar la temperatura del subsuelo después de las épocas de mayor demanda en el año (invierno y verano). Después de 25 años de funcionamiento del sistema, la zona de afectación térmica mayor que 0,5°C no sobrepasa los 20m, desde el arreglo de intercambiadores de calor en su máxima extensión, por lo que no se afecta el recurso geotérmico de los vecinos.

Para predecir la sustentabilidad económica, se compara la geotermia con el aire acondicionado convencional, considerando la inversión inicial de ambas opciones y el ahorro económico en operación, debido al mejor rendimiento de la geotermia. No se consideran alternativas de combustión, porque no suplen demandas de calefacción y refrigeración. El escenario actual, indica un tiempo de retorno de la inversión de ~32 años para la geotermia, debido principalmente al elevado costo de perforación. Es importante considerar que esta tecnología es novedosa en el país y, por lo tanto, implica una alta inversión inicial en los primeros prototipos.

## Agradecimientos

Agradezco al proyecto FONDAP/CONICYT N°15090013 (Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes, CEGA) y el Fondo de Innovación para las Competencias del Gobierno Regional de Aysén BIP-30346723-0 (Estimación y valorización del potencial geotérmico Ayén), por el financiamiento de las campañas de terreno, mediciones geofísicas, análisis de laboratorio y el curso de FEFLOW.

Agradezco a los integrantes de la comisión para esta tesis de magister por su apoyo y confianza, Dr. Diego Morata, Dra. Linda Daniele y Dra. Saskia Roels. Agradezco la posibilidad que me han dado de realizar mi tesis de magister y trabajar de manera simultánea.

Agradezco a DHI, desarrollador del software FEFLOW de MIKE, por facilitarme una licencia de estudiante para trabajar en la tesis de magister.

Agradezco al equipo de trabajo de la SEREMI de Minería por su apoyo en las diversas iniciativas relacionadas al uso de la energía geotérmica. En particular, agradezco el apoyo de la Dra. Ana Valdés Durán

Agradezco la cooperación de Bárbara Blanco y Sebastián Bahamondes del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, en la medición y procesamiento de perfiles verticales de resistividad eléctrica y a quienes gentilmente nos dejaron realizar mediciones en la ciudad de Coyhaique.

Agradezco a Florian Schäfer, por realizar las mediciones de propiedades térmicas e hidráulicas en muestras de roca de Coyhaique, en el Institute of Geoscience de la Friedrich-Schiller University Jena.

Agradezco a mi familia (Bárbara y Aurorita) por su apoyo incondicional y comprensión durante la realización de este trabajo. El sacrificio de mi tiempo, también fue también el de ellas. Además, agradezco a mis padres y hermana por su constante apoyo.

Agradezco a mis compañeros de trabajo, por sus valiosas acotaciones que aportaron significativamente en este trabajo.

## Tabla de contenido

1.	Introducción .....	1
1.1	Formulación del proyecto .....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.2.1	Objetivo principal.....	2
1.2.2	Objetivos específicos.....	2
1.3	Área de estudio .....	3
1.3.1	Ubicación y accesos.....	3
1.3.2	Contexto geológico de la cuenca del río Coyhaique .....	4
1.4	Hipótesis de trabajo .....	8
2.	Recursos hídricos superficiales .....	9
2.1	Precipitaciones pluviométricas y evapotranspiración.....	10
2.2	Registro fluviométrico .....	10
2.3	Balance hídrico en la cuenca del río Coyhaique.....	11
2.3.1	Registro de precipitaciones en la cuenca del río Coyhaique .....	12
2.3.2	Caudal evacuado de la cuenca del río Coyhaique a través del río.....	14
3.	Geometría del modelo temperatura del subsuelo y altura del nivel estático.....	16
3.1	Pozos con información estratigráfica.....	17
3.2	Perfiles verticales de resistividad eléctrica (Transiente Electro Magnético-TEM) .....	17
3.2.1	Medición de Perfiles verticales de resistividad eléctrica.....	18
3.2.2	Perfiles verticales de resistividad eléctrica.....	20
3.3	Temperatura y nivel estático en pozos para captar agua subterránea .....	23
4.	Propiedades físicas de rocas y sedimentos .....	25
4.1	Propiedades hidráulicas .....	26
4.1.1	Medición de permeabilidad .....	27
4.1.2	Resumen propiedades hidráulicas .....	29
4.2	Propiedades térmicas .....	29
4.2.1	Medición de conductividad y difusividad térmica con Escáner de Conductividad Térmica 30	
4.2.2	Medición de conductividad térmica con fuente lineal.....	32
4.2.3	Resumen de propiedades térmicas.....	34
5.	Carga térmica y demanda energética .....	35

5.1	Cálculo de carga térmica.....	35
5.1.1	Ganancias o pérdidas por transmisión .....	35
5.1.2	Ganancias solares .....	36
5.1.3	Ganancias internas sensibles .....	38
5.1.4	Ganancias o pérdidas sensibles por renovaciones de aire .....	38
5.1.5	Ganancias o pérdidas latentes por renovaciones de aire.....	38
5.1.6	Ganancias internas latentes.....	38
5.2	Cálculo de demanda energética .....	39
5.3	Bomba de calor geotérmica .....	40
5.3.1	Funcionamiento de la bomba de calor geotérmica .....	40
5.3.2	Rendimiento de la bomba de calor geotérmica .....	42
5.4	Carga térmica edificio del Gobierno Regional de Aysén .....	42
5.5	Demanda energética del Gobierno Regional de Aysén .....	45
6.	Métodos numéricos .....	47
6.1	Ecuaciones para la transferencia de agua y calor.....	47
6.2	Condiciones de borde para el flujo de agua .....	49
6.4	Transferencia de calor: intercambiadores de calor verticales cerrados .....	51
6.5	Implementación del intercambiador de calor vertical cerrado.....	54
7	Transferencia de agua subterránea .....	55
7.1	Modelo conceptual para la transferencia de agua subterránea.....	55
7.2	Geometría del dominio y enmallado para la transferencia de agua subterránea .....	56
7.3	Configuración del problema para la transferencia de agua subterránea .....	57
7.4	Propiedades del modelo para la transferencia de agua subterránea.....	57
7.5	Parámetros para calibrar el modelo.....	59
7.6	Resultados circulación de agua subterránea en la cuenca del río Coyhaique .....	60
8	Transferencia de calor intercambiadores de calor verticales cerrados .....	64
8.1	Energía térmica transferida y disipada en el subsuelo .....	64
8.2	Configuración del problema .....	65
8.2.1	Geometría y enmallado alrededor de los intercambiadores.....	65
8.2.2	Propiedades térmicas del subsuelo y los intercambiadores de calor verticales .....	66
8.3	Resultados transferencia de calor intercambiadores de calor verticales cerrados .....	67
8.3.1	Registro de temperaturas 1 año de funcionamiento.....	67

8.3.2	Registro de temperatura después de 25 años de funcionamiento .....	69
9	Análisis de inversión inicial y costo de operación .....	71
9.1	Inversión inicial y costos de mantención Geotermia .....	71
9.2	Rendimiento, inversión inicial y costos de mantención del aire acondicionado convencional .....	71
9.3	Tiempo de retorno de la inversión Geotermia vs aire acondicionado convencional .....	72
10	Discusiones y alcances de los resultados.....	73
10.1	Recursos hídricos superficiales.....	73
10.2	Geometría del modelo.....	73
10.3	Propiedades hidráulicas y térmicas de las unidades del modelo .....	74
10.4	Modelo de agua subterránea .....	74
10.5	Modelo de transferencia de calor de los intercambiadores de calor verticales cerrados .....	74
10.6	Evaluación económica .....	76
11	Conclusiones.....	77
	Bibliografía .....	78
	Anexo .....	81

## Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación y vías de acceso de la ciudad de Coyhaique y la cuenca hidrográfica del río Coyhaique. ....	3
Figura 2. Mapa geológico de la cuenca del río Coyhaique. ....	6
Figura 3. Simbología del mapa geológico de la cuenca del río Coyhaique. ....	7
Figura 4. Sistema de intercambiadores de calor verticales cerrados (RETScreen, 2005). ....	8
Figura 5. Estaciones meteorológicas y fluviométricas de la región de Aysén en la latitud de Coyhaique. ....	9
Figura 6. Registro de recitaciones anuales en las estaciones meteorológicas de Puerto Aysén, Coyhaique y Coyhaique Alto (DGA-Reportes, 2017). ....	11
Figura 7. Cuenca hidrográfica del río Coyhaique con la ubicación de estaciones meteorológicas y fluviométricas. ....	12
Figura 8. Registro de recitaciones anuales en las estaciones meteorológicas de Coyhaique, CONAF y Coyhaique Alto (Fuente: Dirección General de Aguas - DGA). ....	13
Figura 9. Registro del caudal promedio mensual en la estación fluvial Tejas Verdes, ubicada en el extremo oeste de la cuenca del río Coyhaique. ....	14
Figura 10. Ubicación de pozos con información estratigráfica, temperatura y nivel estático, además de los puntos de medición de Transiente Electromagnético (TEM) en la ciudad de Coyhaique y sus alrededores. ....	16
Figura 11. Columnas estratigráficas disponibles en la ciudad de Coyhaique y sus cercanías. Lo sondajes S-02 y S-01 son modificados del trabajo de Páez (2011). La estratigrafía del sondaje Relleno Sanitario es original de este trabajo. ....	17
Figura 12. Esquema del funcionamiento del método Transiente Electromagnético TEM (Modificado WalkTEM-Manual, 2015). ....	18
Figura 13. Etapas de medición en TEM: (a) Pulso de transmisión, (b) inducción electromagnética y (c) campo magnético secundario (Modificado ABEM-WalkTEM-Manual 2015). ....	19
Figura 14. Izquierda: vista en planta de la disposición para la medición de TEM, con la bobina receptora central, la bobina receptora de 10x10m y el loop del transmisor dispuestos de manera concéntrica. Derecha: medición TEM en recito Ogana de Coyhaique. ....	19
Figura 15. Medición de Transiente Electromagnético 1 en Coyhaique. Coordenadas UTM: 730442E, 4947951N - Datum: WGS84 zona18S. Loop transmisor 40x40m <sup>2</sup> . ....	20
Figura 16. Medición de Transiente Electromagnético 2 en Coyhaique. Coordenadas UTM: 728197E, 4949839N - Datum: WGS84 zona18S. Loop transmisor 100x100m <sup>2</sup> . ....	21
Figura 17. Medición de Transiente Electro Magnético 3 en Coyhaique. Coordenadas UTM: 730367E, 4948839N - Datum: WGS84 zona18S. Loop transmisor 40x40m <sup>2</sup> . ....	21

Figura 18. Medición de Transiente Electromagnético 4 en Coyhaique. Coordenadas UTM: 729526E, 4949211N - Datum: WGS84 zona18S. Loop transmisor 40x40m <sup>2</sup> .....	22
Figura 19. Medición de Transiente Electromagnético 5 en Coyhaique. Coordenadas UTM: 728422E, 4948556N - Datum: WGS84 zona18S. Loop transmisor 40x40m <sup>2</sup> .....	22
Figura 20. Medición de temperatura y nivel estático en pozos para captar agua subterránea.....	23
Figura 21. Medición de temperatura y nivel estático en pozos para captar agua subterránea, en la ciudad de Coyhaique y sus alrededores.....	24
Figura 22. Ubicación de las muestras de roca para la medición de propiedades hidráulicas y térmicas en las rocas que constituyen el basamento rocoso en la ciudad de Coyhaique.....	25
Figura 23. TinyPerm II de NER. Izquierda: componentes del equipo. Derecha: carta de calibración del equipo. (Modificado de TinyPerm-Manual 2013; TinyPerm-Calibración 2013).....	27
Figura 24. Medición de permeabilidad con el TinyPerm II de NER. Izquierda: medición en el Institute of Geoscience de la Friedrich-Schiller University Jena. Derecha: medición en el Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA), en Departamento de Geología de la Universidad de Chile. ....	28
Figura 25. Escáner de Conductividad Térmica (TCS) de Lippmann and Rauen GbR. Izquierda: la plataforma para escanear la muestra y los estándares (sobre la línea roja). Derecha: la "cabeza óptica" compuesta de la fuente de calor móvil y sensores de temperatura en cada lado (la fecha amarilla indica el movimiento de la cabeza óptica). ....	30
Figura 26. Preparación de muestras para medición de conductividad y difusividad térmica con el Escáner de Conductividad Térmica (TCS).....	31
Figura 27. Medición de conductividad y difusividad térmica con el Escáner de Conductividad Térmica (TCS). Izquierda: ubicación de la muestra de roca respecto de los estándares en la plataforma de medición. Derecha: registro de temperaturas: en azul la temperatura antes de calentar y en rojo la temperatura después de calentar. ....	31
Figura 28. Equipo KD2Pro de Decagon Devices. Izquierda: el equipo de medición con diversas sondas. Derecha: sonda RK1 específica para medir conductividad térmica de rocas. ....	32
Figura 29. Medición de conductividad térmica con el equipo KD2Pro en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile.....	33
Figura 30. Izquierda: aproximación por zonas para determinar transferencias de calor entre diversos ambientes al interior del edificio. Derecha: simplificación del edificio como 1 bloque de base cuadrada (Modificado de RETScreen 2005). ....	35
Figura 31. Ganancias solares en función de la temperatura exterior (Modificado de RETScreen 2005).....	36
Figura 32. Izquierda: cargas térmicas de calefacción entre la temperatura de diseño de calefacción y la temperatura de confort al interior del edificio. Derecha: Registro de intervalos de temperatura para los cuales se requiere calefacción (Modificado de RETScreen 2005).....	39



Figura 33. Esquema del ciclo termodinámico de una bomba de calor típica con colectores geotérmicos verticales cerrados (Modificado de Self et al., 2013). .....	41
Figura 34. Edificio del Gobierno Regional de Aysén. ....	43
Figura 35. Demanda energética de calefacción y refrigeración del edificio del Gobierno Regional Aysén y balance energético mensual. Barras azules representan refrigeración, barras rojas representan calefacción y la línea negra muestra el balance energético mensual. ....	46
Figura 36. Perfil vertical de un acuífero que indica condiciones no-confinadas para un acuífero (Modificado de Diersch, 2014).....	47
Figura 37. Coeficiente de transferencia $\phi h = \phi h_{in}$ , para el cual el estado de colmatación de un río genera infiltración hacia el acuífero (Modificado de Diersch, 2014).....	50
Figura 38. Coeficiente de transferencia $\phi h = \phi h_{out}$ , para el cual el estado de colmatación de un río genera flujo de agua del acuífero al río (Modificado de Diersch, 2014). ....	51
Figura 39. Esquema de intercambiador de calor vertical cerrado tipo doble U o 2U (Al-Khoury & Bonnier 2006).....	52
Figura 40. Relación de resistencias térmicas entre las cañerías del intercambiador de calor 2U y los 4 componentes del mortero. A la izquierda: la relación espacial y de tamaño entre los componentes del intercambiador de calor, además de los valores de temperatura y resistencia térmica. En el centro: la relación entre las temperaturas del mortero y el suelo. A la derecha: la relación entre las temperaturas de las cañerías y las partes del mortero (Diersch et al. 2011a). ....	53
Figura 41. Intercambiador de calor 2U discretizado (Diersch et al. 2011a).....	54
Figura 42. Modelo conceptual para la transferencia de agua subterránea en la Cuenca del río Coyhaique. ....	55
Figura 43. Geometría y enmallado del dominio del modelo para la transferencia de agua subterránea.....	57
Figura 44. Recarga de agua lluvia en el modelo para la transferencia de agua subterránea. ....	58
Figura 45. Conductividad hidráulica en la dirección x en la cercanía de la ciudad de Coyhaique. ....	59
Figura 46. Coeficiente de transferencia $\phi h_{in}$ en las cercanías de la ciudad de Coyhaique.....	60
Figura 47. Resultado de carga hidráulica para el flujo de agua subterránea en la Cuenca de Coyhaique.....	61
Figura 48. Presión de agua en la parte superior del modelo.....	61
Figura 49. Ubicación de los puntos de control para la carga hidráulica.....	62
Figura 50. Relación entre la carga hidráulica calculada por FEFLOW y la carga hidráulica medida en los puntos de control.....	63
Figura 51. Energía transferida al suelo y captada desde el suelo a lo largo de un año. ....	64

Figura 52. Enmallado para cada intercambiador de calor. Izquierda: puntos que conforman el intercambiador de calor vertical y elementos con forma de triángulos equiláteros a su alrededor (Diersch et al., 2011b). Derecha: enmallado alrededor de un intercambiador de calor vertical para el presente trabajo. .... 65

Figura 53. Registro de temperatura del fluido refrigerante que entra y sale del arreglo de intercambiadores de calor a lo largo de un año. .... 67

Figura 54. Perfil de temperatura en los intercambiadores de calor verticales tipo 2U. Las líneas azules indican temperatura de entrada del refrigerante a los intercambiadores de calor. Las líneas rojas indican temperatura de salida del refrigerante a los intercambiadores de calor (temperatura de entrada a la bomba de calor). Las líneas negras indican la temperatura del mortero. La elevación [m], indica la altitud en el dominio [msnm]. .... 68

Figura 55. Registro de temperatura del fluido refrigerante que entra y sale del arreglo de intercambiadores de calor a lo largo de 25 años de funcionamiento. .... 69

Figura 56. Zona de afectación termal creada por el funcionamiento del arreglo de intercambiadores de calor después de 25 años de funcionamiento. .... 70

Figura 57. Registro de temperatura del fluido refrigerante que entra y sale del arreglo de intercambiadores de calor a lo largo de 25 años de funcionamiento solo en modo de calefacción. .... 75

## Índice de Tablas

Tabla 1. Registro de precipitación pluvial (pp) y evapotranspiración potencial (ET) en la cuenca del río Coyhaique en el periodo 2005-2015. ....	13
Tabla 2. Caudal promedio mensual del río Coyhaique registrado en la estación fluvial Tejas Verdes. ....	15
Tabla 3. Ubicación de las muestras para la medición de propiedades hidráulicas y térmicas en las rocas que constituyen el basamento rocoso en la ciudad de Coyhaique. Además, se señala el lugar donde se realizaron las mediciones de laboratorio. ....	25
Tabla 4. Propiedades hidráulicas de las rocas que constituyen el basamento rocoso en la ciudad de Coyhaique. ....	29
Tabla 5. Propiedades térmicas de las rocas que constituyen el basamento rocoso en la ciudad de Coyhaique. ....	34
Tabla 6. Dimensiones del edificio, parámetros térmicos de la envolvente y temperaturas de diseño. ....	43
Tabla 7. Resumen de cargas térmicas edificio del Gobierno Regional de Aysén. ....	44
Tabla 8. Demanda energética de calefacción y refrigeración del edificio del Gobierno Regional Aysén. ....	45
Tabla 9. Rango de parámetros hídricos para la calibración del modelo de transferencia de agua subterránea. ....	58
Tabla 10. Energía transferida al suelo y captada desde el suelo a lo largo de un año y potencia promedio mensual transferida/capta desde/hacia el suelo. ....	65
Tabla 11. Propiedades térmicas del subsuelo y agua subterránea. ....	66
Tabla 12. Costo de los intercambiadores de calor verticales cerrados tipo 2U. ....	71
Tabla 13. Consumo energético anual y promedio mensual para climatizar el edificio del Gobierno Regional de Aysén con geotermia y aire acondicionado convencional. ....	72
Tabla A-14. Perfil de temperatura y conductividad eléctrica en el pozo Juana Sánchez. ....	81
Tabla A-15. Perfil de temperatura y conductividad eléctrica en el pozo Carmen. ....	81
Tabla A-16. Perfil de temperatura y conductividad eléctrica en el pozo Coyhaique Alto. ....	81
Tabla A-17. Perfil de temperatura y conductividad eléctrica en el pozo Relleno Sanitario. ....	82
Tabla A-18. Perfil de temperatura y conductividad eléctrica en el pozo Club de Leones Coyhaique. ....	83
Tabla A-19. Detalle de las mediciones de propiedades hidráulicas de las rocas que constituyen el basamento rocoso en la ciudad de Coyhaique. ....	84
Tabla A-20. Detalle de las mediciones de propiedades térmicas de las rocas que constituyen el basamento rocoso en la ciudad de Coyhaique. ....	85
Tabla A-21. Detalle cargas térmicas edificio del Gobierno Regional de Aysén. ....	87

Tabla A-22. Valor traslado de equipo de perforación del sondeo geotérmico por día.....	88
Tabla A-23. Valor de perforación del sondeo geotérmico por metro.....	88
Tabla A-24. Sonda doble e instalación.....	89
Tabla A-25. Costo bomba de calor agua-agua. ....	90
Tabla A-26. Costo bomba de calor aire-agua. ....	91

# 1. Introducción

## 1.1 Formulación del proyecto

Las bombas de calor geotérmicas son una de las aplicaciones de energías renovables que han crecido más rápidamente en los últimos años. El número de bombas de calor geotérmicas aumentó ~10% anual entre 2010 y 2015. En 2015, la capacidad instalada en el mundo era 50.258 MWt y el uso anual era 326.848 TJ/año. Lo anterior, representa el 70,9% de la capacidad instalada y el 55,15% de la utilización del uso directo de la energía geotérmica (Lund and Boyd, 2016).

Coyhaique es una ciudad con serios problemas de contaminación ambiental y gran parte de la contaminación se debe a la calefacción por combustión de leña. Debido a lo anterior, la ciudad de Coyhaique sobrepasa ampliamente la norma de calidad primaria para material particulado respirable durante los meses de otoño e invierno. En este contexto, la ciudad fue declarada zona saturada por material particulado respirable MP10 por concentración diaria y anual, a través del decreto Supremo N°33 de agosto de 2012, del Ministerio de Medio Ambiente. Con estos antecedentes, se elaboró un Plan de Descontaminación Ambiental para la ciudad de Coyhaique y sus alrededores (PDA-Coyhaique, 2014), el cual promueve el uso de alternativas no contaminantes para calefacción. No existe aún, un amplio registro del material particulado respirable MP2.5.

En este trabajo, se propone como solución a los problemas de contaminación de la ciudad de Coyhaique, el uso de bombas de calor geotérmicas (BCG) para climatizar ambientes. Las BCG utilizan electricidad para funcionar, por lo que no tienen emisiones locales de material particulado ni gases efecto invernadero. Las BCG concentran y transportan calor desde el suelo a la superficie para entregar calefacción y desde la superficie al suelo para entregar refrigeración. Su funcionamiento requiere energía eléctrica y tienen una eficiencia que llega hasta el 300-600% incluso en las noches frías de invierno (Self et al., 2013). Las BCG representan ahorros de 25-50% respecto del aire acondicionado convencional (US Department Of Energy 2011) y en Coyhaique tienen costos de operación similares al pellet (Maripanguí et al., 2016). Considerando que el subsuelo es un medio semipermeable a impermeable y la falta de espacio horizontal, se propone una BCG con intercambiadores de calor verticales cerrados.

Para realizar el análisis de sustentabilidad técnica, se modela el funcionamiento de este sistema de climatización en el edificio del Gobierno Regional de Aysén, porque es un edificio representativo de la ciudad con alto estándar de aislamiento térmico. Debido a la falta de información respecto de la circulación de agua subterránea en la ciudad de Coyhaique, se realiza un modelo estacionario, para la transferencia de agua subterránea para toda la cuenca del río Coyhaique. Posteriormente, en la ciudad de Coyhaique, se realiza la modelación de transferencia de calor entre los intercambiadores de calor y el subsuelo de manera transiente durante 25 años, para determinar el número y profundidad de los intercambiadores de calor que son necesarios en el caso de estudio. Se espera que los resultados permitan implementar esta tecnología en edificios de características similares. Para predecir la sustentabilidad económica, se compara la geotermia con el aire acondicionado convencional, considerando la inversión inicial de ambas alternativas y el ahorro económico en operación, debido al mejor rendimiento de la bomba de calor geotérmica.

## 1.2Objetivos

### 1.2.1 Objetivo principal

Predecir la sustentabilidad técnica y económica de implementar y operar un sistema de climatización con bomba de calor geotérmica en el edificio del Gobierno Regional de Aysén en la ciudad de Coyhaique.

### 1.2.2 Objetivos específicos

1. Identificar el recurso geotérmico de muy baja temperatura en el área de interés. Este recurso geotérmico, considera la geometría de las unidades geológicas en profundidad, así como sus propiedades hidráulicas y térmicas, además de la circulación de agua subterránea.
2. Determinar la energía térmica transferida con el subsuelo, considerando la demanda energética mensual de calefacción y refrigeración para el edificio del Gobierno Regional de Aysén.
3. Establecer el número, tamaño y disposición de los intercambiadores de calor verticales cerrados, mediante un modelo de transferencia de calor entre los intercambiadores y el subsuelo, a lo largo de un año.
4. Predecir la sustentabilidad del recurso geotérmico, en base a la zona de afectación termal modelada en el subsuelo, después de 25 años de funcionamiento.
5. Estimar la inversión inicial de implementar climatización geotérmica, en el edificio del Gobierno Regional de Aysén y los ahorros económicos en la operación, respecto de un sistema de aire acondicionado convencional.

### 1.3 Área de estudio

#### 1.3.1 Ubicación y accesos

Aunque el área específica de interés está en la ciudad de Coyhaique, la falta de información respecto de la circulación de agua subterránea, implica hacer un análisis en toda la cuenca hidrográfica del río Coyhaique, para tener una estimación consistente. Entonces, el área de estudio para determinar la circulación de agua subterránea es la cuenca hidrográfica donde se encuentra la ciudad de Coyhaique y para el estudio específico del funcionamiento de una bomba de calor geotérmica, el área de estudio es la ciudad de Coyhaique (Figura 1).

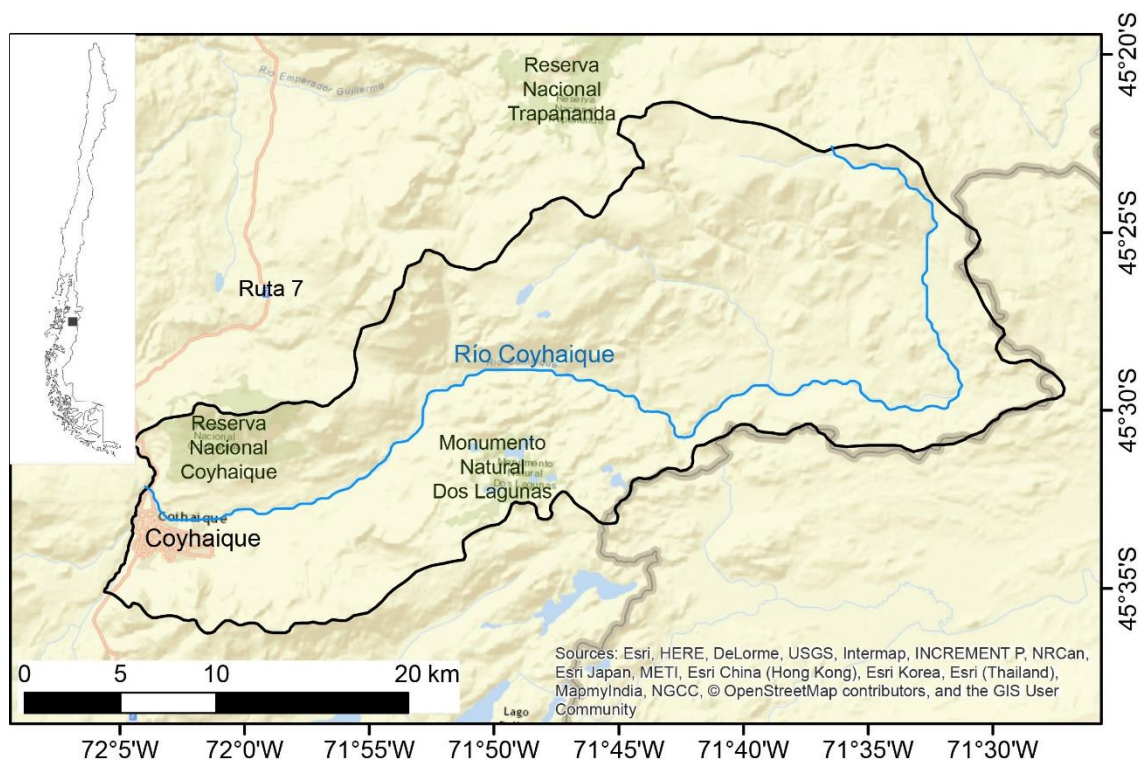


Figura 1. Ubicación y vías de acceso de la ciudad de Coyhaique y la cuenca hidrográfica del río Coyhaique.

La ciudad de Coyhaique es la capital regional y principal núcleo urbano de la región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo. La principal ruta de acceso a la ciudad de Coyhaique y la cuenca hidrográfica, es la Ruta-7, conocida como *Carretera Austral*. Esta ruta, pasa por el borde oeste de la ciudad. Además de la ruta 7, existe la ruta internacional CH-240, que une Coyhaique con Coyhaique Alto y permite el paso a Argentina.

### 1.3.2 Contexto geológico de la cuenca del río Coyhaique

La cuenca del río Coyhaique, se encuentra al este la Cordillera Principal y al oeste de la Zona de Pampas. El basamento de la cuenca del río Coyhaique, está compuesto por formaciones estratificadas depositadas entre el Jurásico Superior y Cretácico Superior. Estas formaciones están intruidas por batolitos, stocks y cuerpos hipabisales de edades comprendidas entre el Cretácico Superior y Oligoceno (De la Cruz et al., 2003; Suárez et al., 2007). Los rasgos geomorfológicos y los depósitos sedimentarios, en la cuenca del río Coyhaique, son de origen glacial (De la Cruz et al., 2003; Arqueros, 2004; Suárez et al., 2007).

A continuación, se presenta una descripción de las unidades geológicas que componen el basamento rocoso y depósitos sedimentarios de la cuenca del río Coyhaique. Además, se describen las estructuras y los principales rasgos geomorfológicos de la cuenca (Figura 2).

#### 1.3.2.1 Basamento rocoso de la cuenca del río Coyhaique y estructuras

En la base de las Formaciones estratificadas está la Formación Ibañez (Jurásico medio alto – Berriasiano), la cual está formada por rocas volcánicas y volcanoclásticas de composición predominantemente ácida (De la Cruz et al., 2003; Suárez et al., 2007).

Sobreyace a la Formación Ibañez el Grupo Coyhaique (Cretácico Inferior), que corresponde a una secuencia de rocas principalmente sedimentarias marinas. De base a techo, las formaciones del Grupo Coyhaique son las siguientes: i) Formación Toqui compuesta por calizas, areniscas, lutitas y tobas; ii) Formación Katterfeld compuesta principalmente por lutitas; y iii) Formación Apeleg compuesta por areniscas y lutitas (De la Cruz et al., 2003; Suárez et al., 2007; Páez, 2011).

Sobre el Grupo Coyhaique, se encuentra la Formación Divisadero (Aptiano), la cual sobreyace en contacto paraconcordante a la Formación Apeleg y localmente a la Formación Ibañez. La Formación Divisadero está compuesta por rocas volcanoclásticas con intercalaciones de lavas. La Formación El Toro (Cretácico Superior alto) sobreyace en aparente discordancia angular a la Formación Divisadero y consiste en una secuencia de lavas basálticas, andesíticas y dacíticas (De la Cruz et al., 2003; Suárez et al., 2007).

Las formaciones estratificadas están intruidas por batolitos y stocks ácidos del Cretácico Superior, el Gabro Bandurrias del Oligoceno y cuerpos hipabisales básicos del Oligoceno (De la Cruz et al., 2003; Suárez et al., 2007; Páez, 2011).

El área de estudio se caracteriza por presentar rocas mesozoicas-cenozoicas sub-horizontales o suavemente plegadas, cortadas por fallas de orientación NNW-SSE y NE-SW. Localmente, se reconocen fallas con movimiento vertical limitado. El débil plegamiento que exhiben las rocas en la zona de estudio, sugiere poco acortamiento y el alto manteo que de las fallas principales, sugiere que son fallas normales o de rumbo (De la Cruz et al., 2003).

#### 1.3.2.2 Geomorfología y relleno sedimentario de la cuenca del río Coyhaique

Los rasgos geomorfológicos y depósitos sedimentarios en la cuenca del río Coyhaique, indican que estos fueron modelados y depositados por glaciares de valle y pie de monte, los cuales bajaron hacia el este, desde paleo campos de hielo alojados en la Cordillera Principal. Los rasgos geomorfológicos actuales de la cuenca del río Coyhaique, post Último Máximo Glacial, están



marcados por la erosión del río Coyhaique, con una tasa máxima anual de 2,9 - 3,2 cm/año (Arqueros, 2004).

Los principales depósitos sedimentarios en la cuenca del río Coyhaique (Arqueros, 2004; Páez, 2011) son los siguientes:

- i. Depósitos de till glacial o depósitos glaciares indiferenciados, compuestos por bloques y gravas en una matriz de arena y limo, normalmente sin estructura interna, depositados por el avance y retroceso de los glaciares. Estos sedimentos están ampliamente distribuidos a lo largo de la cuenca del río Coyhaique.
- ii. Depósitos glaciolacustres, compuestos por sedimentos finos (*i.e.* arcilla, limo y arena de grano fino). Estos depósitos afloran a ambos lados del río Coyhaique, en las cercanías de la ciudad de Coyhaique y en menor medida en el sector centro y este de la cuenca.
- iii. Depósitos glaciofluviales, compuestos por gravas y arenas estratificadas horizontalmente, originados por el deshielo de glaciares y el retrabajo de depósitos de till. Estos depósitos afloran principalmente en el sector centro y este de la cuenca del río Coyhaique.
- iv. Depósitos aluviales, compuestos por bloques redondeados a subredondeados, gravas, arenas y limo, generados por transporte hídrico. Existen importantes depósitos aluviales al sur del río Coyhaique, donde se ubica la ciudad de Coyhaique.
- v. Depósitos coluviales, compuestos por bloques angulosos, gravas, arenas, limos y arcillas, depositados por efecto gravitacional y arrastre hídrico. Estos depósitos, se ubican en laderas de cerros, cabeceras de quebradas y escarpes.
- vi. Depósitos fluviales, compuestos por gravas subredondeadas e imbricadas con matriz de arena y limo, localmente clasto-soportados, que incluyen bancos de arena y limo. Se ubican en los márgenes de cursos fluviales activos.



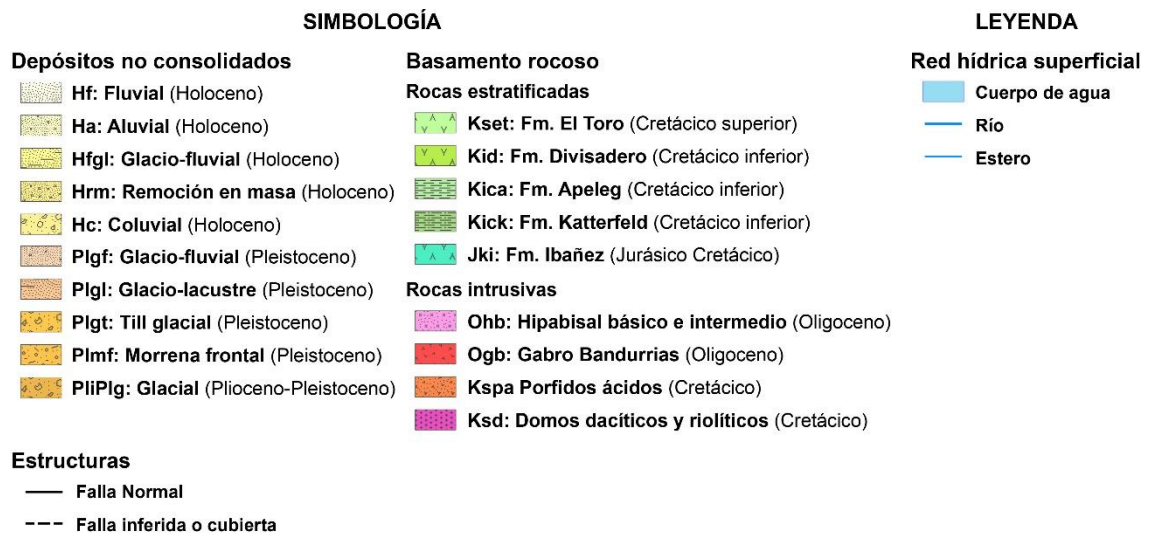


Figura 3. Simbología del mapa geológico de la cuenca del río Coyhaique.

## 1.4 Hipótesis de trabajo

Las Bombas de Calor Geotérmicas (BCG), son una excelente alternativa para calentar ambientes en ciudades con elevados índices de contaminación atmosférica, porque no generan emisiones locales de material particulado ni gases efecto invernadero y además tienen bajos costos de operación y mantenimiento (US Department Of Energy 2011).

En Coyhaique, debido a la escasez de agua subterránea y espacio, la mejor opción son las bombas de calor geotérmicas con intercambiadores verticales cerrados (Figura 4). Estos intercambiadores de calor consisten en tuberías en forma de U enterradas y cementadas, a través de las cuales circula una mezcla de agua con anticongelante que transfiere calor desde el suelo a un ambiente para entregar calefacción y desde un ambiente hacia el suelo para refrigeración (Self et al., 2013). Cada intercambiador de calor tiene una profundidad entre 40 - 150 y se ubican separados al menos por 6m de distancia (ASHRAE, 2009).

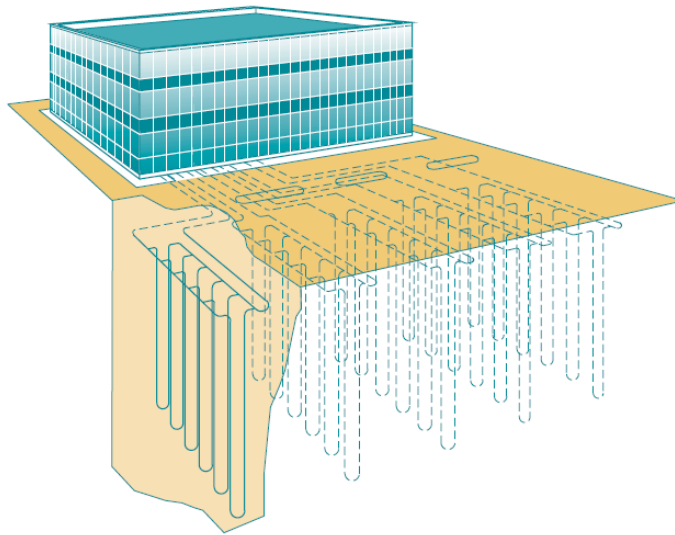


Figura 4. Sistema de intercambiadores de calor verticales cerrados (RETScreen, 2005).

Los intercambiadores de calor son instalaciones en profundidad que deben ser adecuadamente dimensionados de acuerdo a la carga térmica<sup>1</sup> y demanda energética<sup>2</sup> del edificio, además de las propiedades físicas de las unidades geológicas en profundidad y la circulación de agua subterránea. Subestimar los intercambiadores de calor, agota el recurso geotérmico y baja el rendimiento de la BCG. Por otro lado, sobre dimensionar los intercambiadores de calor, aumenta los costos económicos, lo que podría generar la no viabilidad económica del proyecto.

En este contexto, el objetivo de este trabajo es realizar una estimación certera del número y profundidad de los intercambiadores de calor, para suplir de manera adecuada la carga térmica y demanda energética del edificio del Gobierno Regional de Aysén. Lo anterior, permitirá realizar un análisis técnico y económico de la implementación de BCG para demandas energéticas significativas en la ciudad de Coyhaique con un caso de estudio.

<sup>1</sup> Carga térmica: Potencia térmica [Watt] que suple el *peak* de requerimiento energético de calefacción o refrigeración para las temperaturas de diseño de calefacción y refrigeración, respectivamente.

<sup>2</sup> Demanda energética: Consumo energético [Joule] necesario en un periodo de tiempo (días, meses, años).

## 2. Recursos hídricos superficiales

Para cuantificar los ingresos y egresos de agua en la cuenca del río Coyhaique, se realiza un balance de los recursos hídricos superficiales, que corresponden a precipitaciones pluviales y caudales de ríos, los cuales están disponibles en los reportes meteorológicos y fluviométricos de la Dirección General de Aguas (DGA-Reportes, 2017). Para el modelamiento numérico de la transferencia de agua subterránea, el registro de recursos hídricos superficiales permite estimar un rango de valores para la recarga superficial del modelo y calibrar el volumen de agua que el acuífero le entrega a los ríos y esteros.

En la latitud del área de interés, existen 6 estaciones meteorológicas y 3 estaciones fluviométricas (Figura 5). Todas las estaciones meteorológicas se utilizan para determinar una tendencia regional de las precipitaciones pluviales. Sin embargo, solo las estaciones meteorológicas ubicadas dentro de la cuenca del río Coyhaique, se utilizan para determinar bandas de igual precipitación pluvial y se utilizan para estimar la recarga superficial de la cuenca. Por otro lado, se utiliza el registro de la estación fluviométrica Tejas Verdes, para determinar el caudal de agua evacuado de la cuenca del río Coyhaique a través del río.

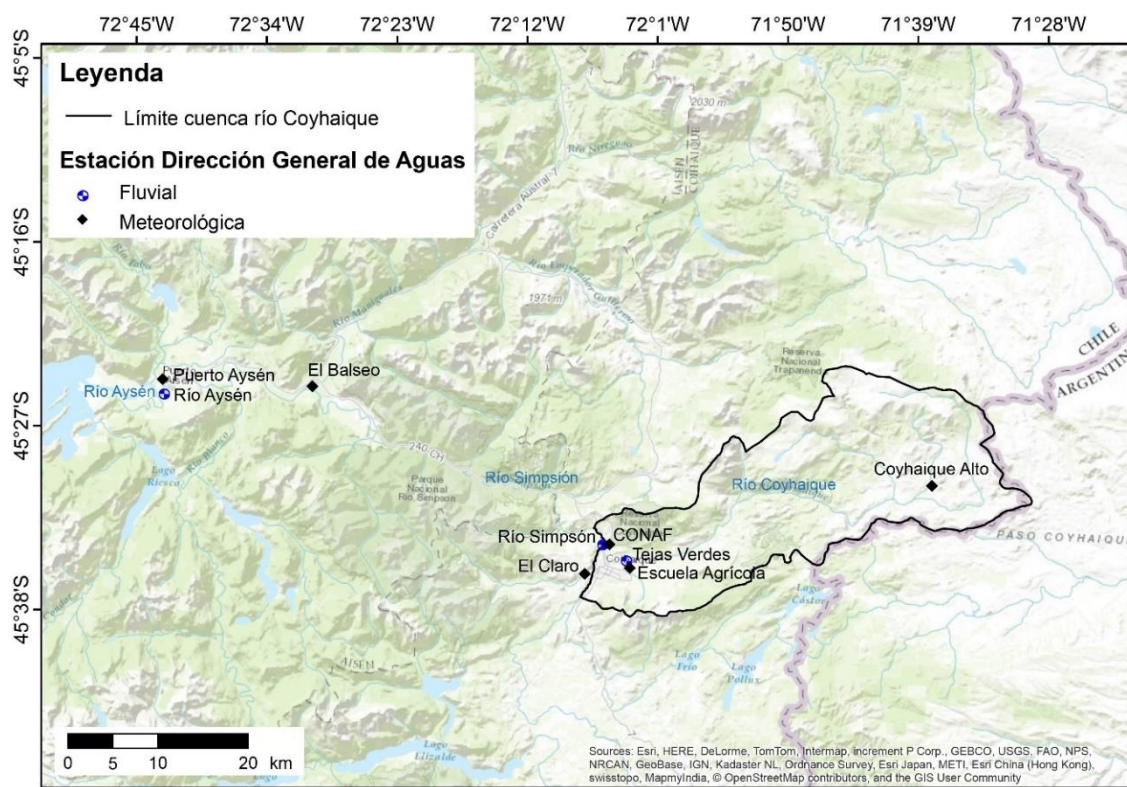


Figura 5. Estaciones meteorológicas y fluviométricas de la región de Aysén en la latitud de Coyhaique.

## 2.1 Precipitaciones pluviométricas y evapotranspiración

Para establecer la correlación de precipitaciones, se consideraron los datos registrados por las estaciones meteorológicas entre los años 2005 y 2015. Este periodo tiene la mayor cantidad de datos disponibles de precipitaciones pluviales en la cuenca del río Coyhaique. Debido al escaso número de estaciones meteorológicas en el área de interés, solo fue posible establecer una correlación de precipitaciones con la longitud geográfica (este-oeste).

Considerando la información disponible en las estaciones meteorológicas, la evapotranspiración se estima de acuerdo al método de Turc (1953), quien definió la siguiente expresión:

$$ET = \frac{pp}{\sqrt{\left(0,9 + \frac{pp^2}{L^2}\right)}} \quad 1$$

Donde,  $ET$  es la evapotranspiración anual [mm/a], la cual se calcula como la precipitación anual  $pp$  [mm/a] dividida por un factor adimensional. Este factor adimensional, considera la precipitación anual  $pp$  [mm/a] y una constante  $L$  que se calcula de la siguiente manera:

$$L = 300 + 25 \cdot T + 0,05 \cdot \sqrt{T} \quad 2$$

Donde,  $L$  depende de la temperatura media anual  $T$  [°C].

## 2.2 Registro fluviométrico

Para determinar el volumen de agua que sale de la cuenca a través del río Coyhaique, se consideró el caudal promedio mensual registrado por la estación fluviométrica Tejas Verdes entre los años 2005 y 2015. Este periodo tiene la mayor cantidad de datos disponibles y coincide con el periodo de tiempo en el que existe un buen registro de las precipitaciones en el área de interés. A partir de los caudales promedio mensuales, se estimó el volumen de agua que sale a través del río durante un año, como el volumen de agua acumulado que sale mes a mes.

### 2.3 Balance hídrico en la cuenca del río Coyhaique

Para cuantificar los ingresos y egresos de agua en la cuenca del río Coyhaique, se realiza un balance de los recursos hídricos superficiales, los cuales corresponden a precipitaciones pluviales y caudales de ríos disponibles en los reportes meteorológicos y fluviométricos de la Dirección General de Aguas entre los años 2005 y 2015 (DGA-Reportes, 2017).

A escala regional, se estableció una correlación exponencial (Figura 6), debido a la disminución abrupta de precipitaciones desde la costa (clima marítimo templado-frío lluvioso) hasta el extremo oriental (clima andino con degeneración estepárica y características de desierto semiárido) (Trewartha, 1961). Las máximas precipitaciones se registran en el sector costero (2200 mm/a). En la ciudad de Coyhaique se registra una precipitación promedio de 950 mm/a. Finalmente, en el sector centro oriental de la cuenca del río Coyhaique se registran 370 mm/a.

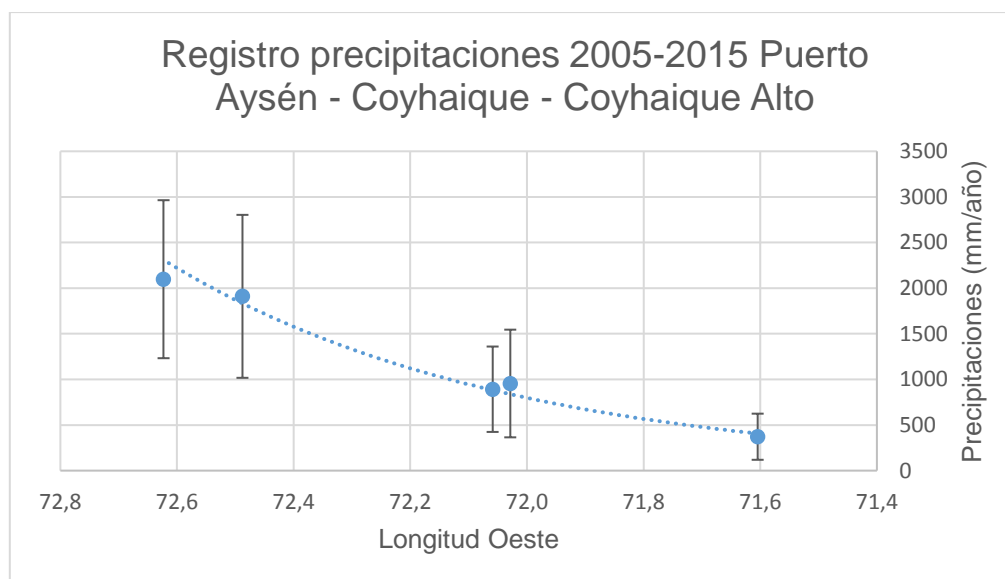


Figura 6. Registro de recitaciones anuales en las estaciones meteorológicas de Puerto Aysén, Coyhaique y Coyhaique Alto (DGA-Reportes, 2017).

Para realizar el análisis de precipitaciones pluviales caídas en le cuenca del río Coyhaique y el volumen de agua evacuado por el río del mismo nombre, se consideraron los límites de cuenca propuestos por Arqueros (2004). De acuerdo a la tendencia regional (Figura 6) se consideró una disminución lineal de precipitaciones pluviales, desde Coyhaique hacia el este. Por un lado, para determinar el volumen de agua que precipita en el área de interés, se consideraron las estaciones meteorológicas: Escuela Agrícola, CONAF y Coyhaique Alto. Por otro lado, para determinar el volumen de agua que sale a través del río Coyhaique, se consideró la estación fluviométrica Tejas Verdes (Figura 7).

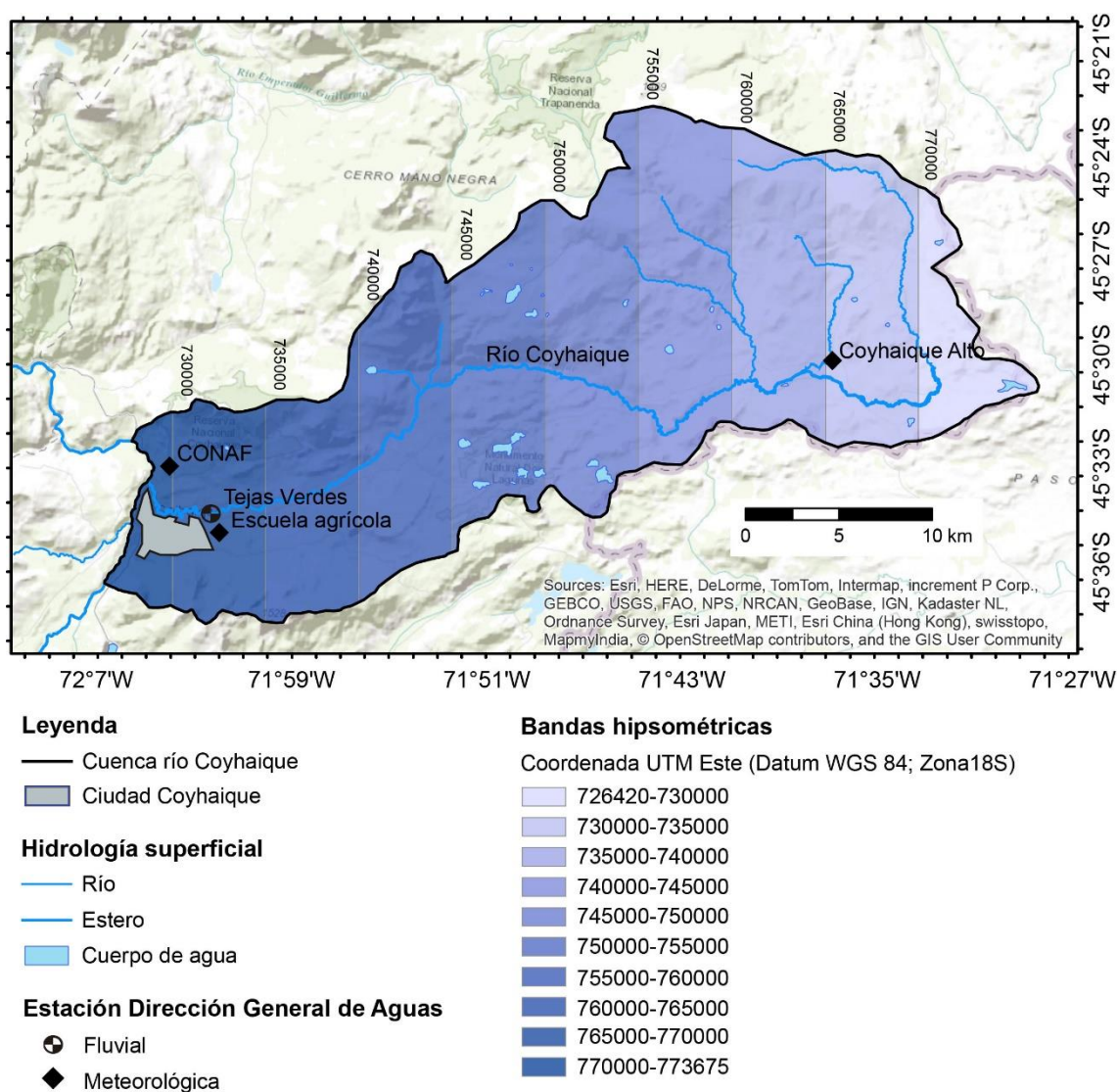


Figura 7. Cuenca hidrográfica del río Coyhaique con la ubicación de estaciones meteorológicas y fluviométricas.

### 2.3.1 Registro de precipitaciones en la cuenca del río Coyhaique

En la cuenca del río Coyhaique se consideró una disminución lineal de las precipitaciones en dirección hacia el este, desde los 954 mm/año en Coyhaique (Estación meteorológica Escuela Agrícola) hasta los 371 mm/año en Coyhaique Alto (Estación meteorológica Coyhaique Alto) (Figura 8).



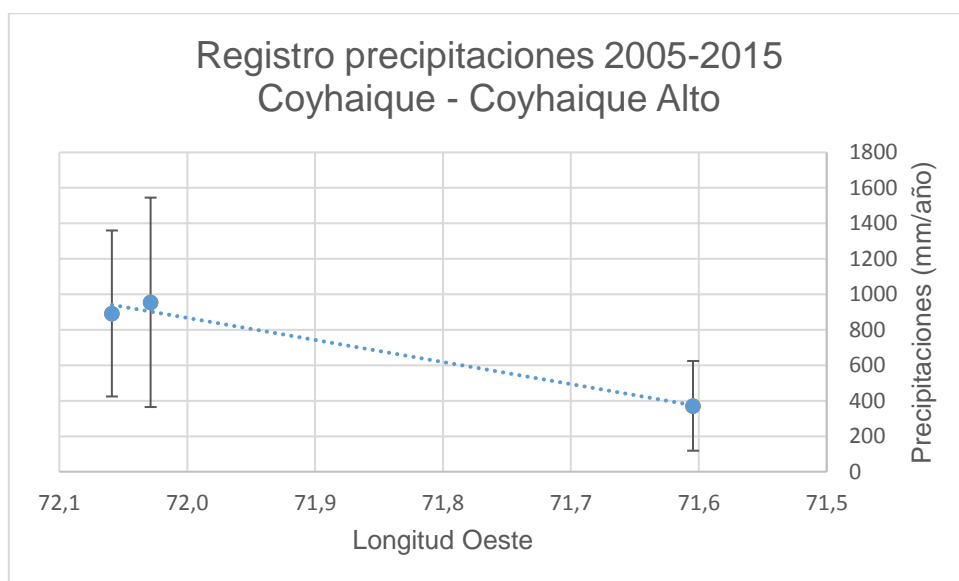


Figura 8. Registro de recitaciones anuales en las estaciones meteorológicas de Coyhaique, CONAF y Coyhaique Alto (Fuente: Dirección General de Aguas - DGA).

Entonces, considerando la disminución lineal de precipitaciones hacia el este y la evapotranspiración de acuerdo al método Turc (1953) (ecuación 1), el volumen de agua anual disponible para escorrentía superficial e infiltración en acuíferos es 158.719.610 m<sup>3</sup> (Tabla 1).

Tabla 1. Registro de precipitación pluvial (pp) y evapotranspiración potencial (ET) en la cuenca del río Coyhaique en el periodo 2005-2015.

Banda hipsométrica			Precipitación pluvial promedio	Evapotranspiración			Agua disponible para ríos e infiltración
Desde	Hasta	Área	pp	t	L	ET	pp – ET
UTM E	UTM E	m <sup>2</sup>	mm/a			mm/a	m <sup>3</sup> /a
726420	730000	21.179.559	950	7,3	485,2	432	27.841.957
730000	735000	55.390.285	880	7,1	481,3	415	28.616.883
735000	740000	59.485.674	810	7	477,5	397	24.149.975
740000	745000	78.481.784	740	6,9	473,6	379	16.025.402
745000	750000	72.543.097	670	6,7	469,7	360	15.314.255
750000	755000	85.446.132	600	6,6	465,9	336	9.508.863
755000	760000	89.840.238	530	6,4	462,1	316	7.126.832
760000	765000	76.653.246	460	6,3	458,2	295	2.574.674
765000	770000	75.518.359	390	6,1	454,4	276	2.979.947
770000	776375	36.596.345	320	6	450,5	259	871.951
Total							158.719.610

### 2.3.2 Caudal evacuado de la cuenca del río Coyhaique a través del río

Para estimar el volumen de agua que se evacúa de la cuenca a través río, se consideró el caudal promedio mensual del río Coyhaique a la salida de la cuenca, durante el periodo comprendido entre los años 2005-2015, en la estación fluvial de Tejas Verdes (DGA-Reportes, 2017) (Figura 9). Este registro indica que el caudal de agua que sale de la cuenca a través del río varía entre  $1\pm 0,3$  m<sup>3</sup>/s al fin del verano y  $13,5\pm 6,3$  m<sup>3</sup>/s al fin del invierno.

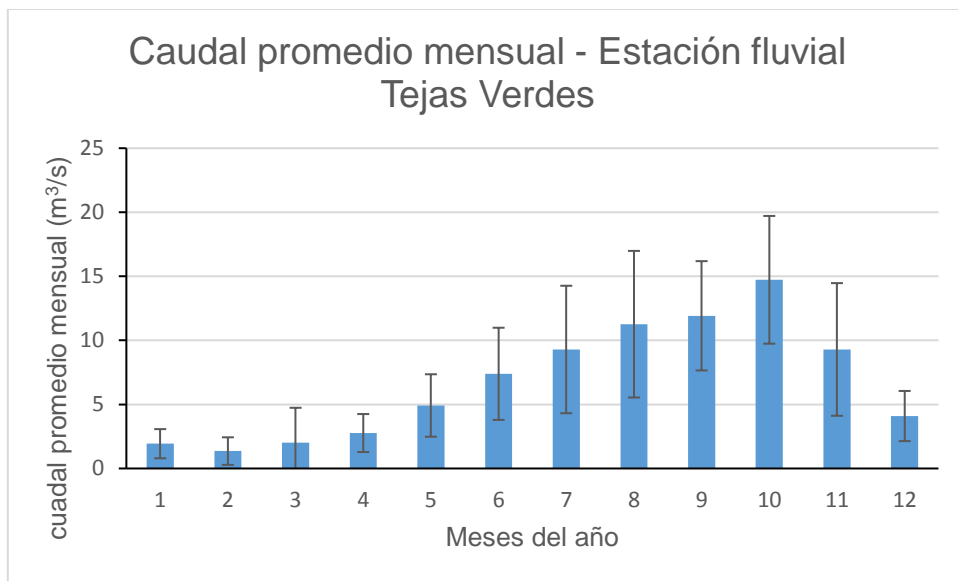


Figura 9. Registro del caudal promedio mensual en la estación fluvial Tejas Verdes, ubicada en el extremo oeste de la cuenca del río Coyhaique.

Con los datos del caudal promedio mensual evacuado, a través del río Coyhaique, se estimó el volumen anual de agua que sale de la cuenca en  $212.665.565\pm 104.349.288$  m<sup>3</sup>/año (Tabla 2).

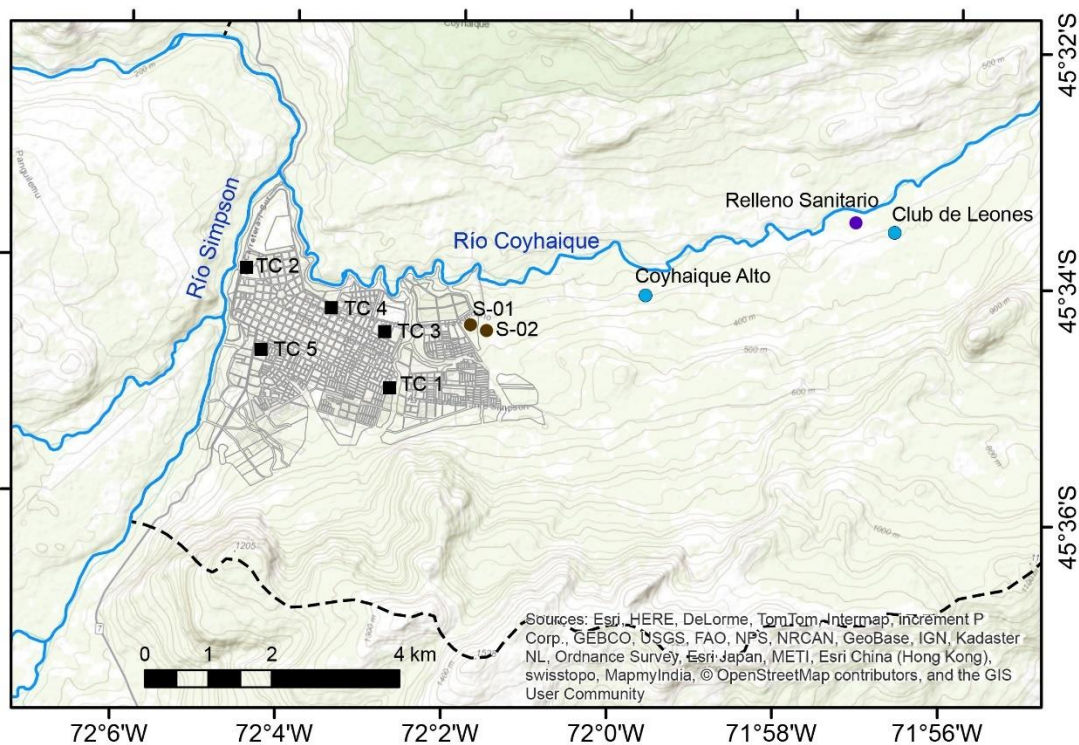
El volumen de agua que sale a través del río (Tabla 1), es mayor que el volumen de agua disponible para escorrentía superficial e infiltración (Tabla 2). Esta diferencia se puede explicar porque la precipitación pluvial aumenta con la altura topográfica (e.g. Kim and Lockwood, 1974) y está diferencia no está registrada en la cuenca del río Coyhaique, donde las estaciones se ubican solo en sectores topográficamente bajos. Además, en la cuenca del río Coyhaique hay precipitación nival, la cual no se registra en las estaciones metrológicas de la DGA.

Tabla 2. Caudal promedio mensual del río Coyhaique registrado en la estación fluvial Tejas Verdes.

mes	año											Caudal promedio mensual [m <sup>3</sup> /s]		Volumen de agua mensual m <sup>3</sup>	
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Valor	STD	Valor	STD
enero	2,2	-	-	-	-	-	2,0	0,6	2,4	1,6	1,8	1,75	0,68	4.691.664	1.823.025
febrero	1,1	-	-	-	-	-	1,2	0,6	1,1	1,2	0,8	1,00	0,28	2.427.264	2.604.404
marzo	2,0	-	-	-	-	-	1,5	1,0	1,3	0,7	1,1	1,27	0,32	3.397.104	7.313.320
abril	2,6	-	-	-	-	-	3,0	1,4	1,2	2,2	2,2	2,11	0,74	5.464.800	3.843.269
mayo	6,3	-	-	-	-	-	3,8	9,0	4,9	6,0	10,1	6,68	2,68	17.887.248	6.528.658
junio	11,5	-	-	-	-	-	4,1	6,6	7,4	13,0	11,8	9,08	3,70	23.539.680	9.322.853
julio	9,2	-	-	-	-	-	-	8,3	8,9	8,5	10,3	9,05	4,10	24.228.806	13.323.911
agosto	8,8	-	-	-	-	-	5,0	10,6	12,1	15,8	12,8	10,84	3,97	29.029.392	15.323.540
septiembre	14,1	-	-	-	-	-	7,5	11,7	22,3	12,4	-	13,60	6,29	35.240.832	11.054.648
octubre	-	-	-	-	-	-	11,3	16,0	15,9	10,3	-	13,37	2,99	35.803.512	13.354.874
noviembre	-	-	-	-	-	-	5,8	13,7	7,6	9,4	-	9,11	3,39	23.613.120	13.418.690
diciembre	6,1	-	-	-	-	5,3	1,8	5,2	2,5	3,3	-	4,04	1,48	10.829.664	5.242.127
<b>Total</b>														<b>216.153.086</b>	<b>103.153.318</b>

### 3. Geometría del modelo temperatura del subsuelo y altura del nivel estático

Para determinar la geometría del modelo de transferencia de agua subterránea en la cuenca del río Coyhaique y posteriormente modelar la transferencia de calor de los intercambiadores de calor verticales cerrados de la bomba de calor geotérmica del edificio del Gobierno Regional de Aysén en la ciudad de Coyhaique, se consideraron las siguientes fuentes de información: i) el límite de la cuenca hidrográfica del río Coyhaique (Arqueros, 2004); la información estratigráfica de 3 pozos ubicados en el borde oriental de la ciudad de Coyhaique (Páez, 2011) y este trabajo; y 5 perfiles verticales de resistividad eléctrica (Transiente Electro Magnético - TEM). Adicionalmente, se midieron perfiles de temperatura y nivel estático en 3 pozos cercanos a la ciudad de Coyhaique (Figura 10).



#### Legenda

- Ciudad Coyhaique
- Límite Cuenca río Coyhaique
- Red hidrográfica
- Pozos estratigrafía
- Pozos nivel estático y temperatura
- Pozos nivel estático y temperatura y estratigrafía
- TEM Coyhaique

Figura 10. Ubicación de pozos con información estratigráfica, temperatura y nivel estático, además de los puntos de medición de Transiente Electromagnético (TEM) en la ciudad de Coyhaique y sus alrededores.

### 3.1 Pozos con información estratigráfica

La información estratigráfica disponible, indica que bajo la ciudad de Coyhaique existe un relleno sedimentario de hasta 50 m de profundidad que coincide con las estimaciones realizadas por Páez (2011), quién sugirió una potencia de ~80m para el relleno sedimentario. El relleno sedimentario, está compuesto principalmente por depósitos de origen glacial. Sin embargo, en el pozo cercano al río (Pozo relleno Sanitario en Figura 10) se observan depósitos fluviales en la parte superior de la columna estratigráfica (Figura 11). Dentro de los depósitos de origen glacial se destacan los sedimentos finos (limo y arcilla) que Arqueros (2004) atribuye a un lago peri-glacial que se formó donde hoy se encuentra la ciudad de Coyhaique.

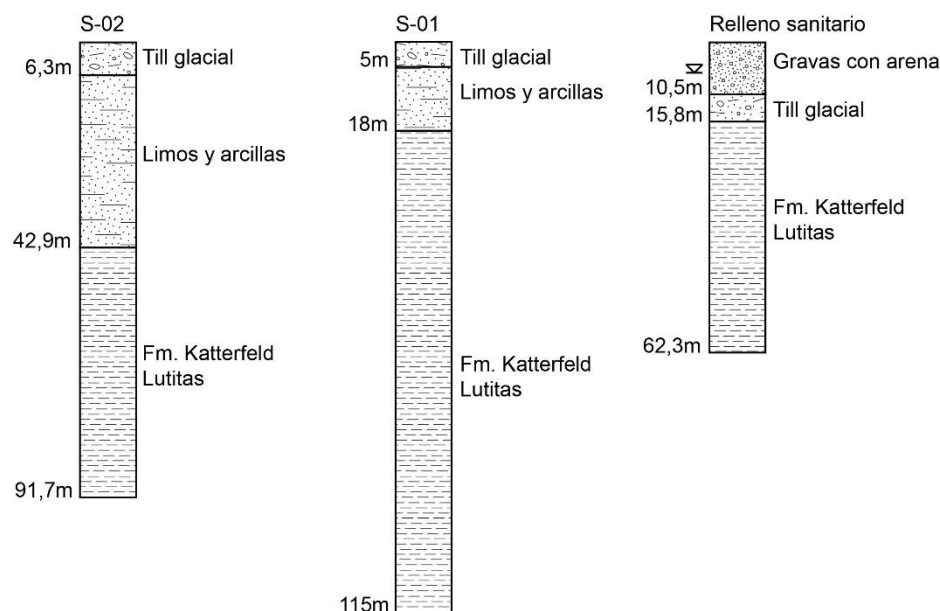


Figura 11. Columnas estratigráficas disponibles en la ciudad de Coyhaique y sus cercanías. Los sondajes S-02 y S-01 son modificados del trabajo de Páez (2011). La estratigrafía del sondaje Relleno Sanitario es original de este trabajo.

### 3.2 Perfiles verticales de resistividad eléctrica (Transiente Electro Magnético-TEM)

En conjunto con el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile y la cooperación de Bárbara Blanco y Sebastián Bahamondes, se realizan mediciones de perfiles verticales de resistividad eléctrica, mediante el método Transiente Electro Magnético (TEM) con el equipo WalkTem de ABEM (WalkTEM-Manual, 2015).

### 3.2.1 Medición de Perfiles verticales de resistividad eléctrica

El método TEM consiste en circular corriente por un *loop* de cable (transmisor), la cual se corta de manera abrupta, provocando una inducción electromagnética en el subsuelo que se registra en una bobina receptora (Figura 12).

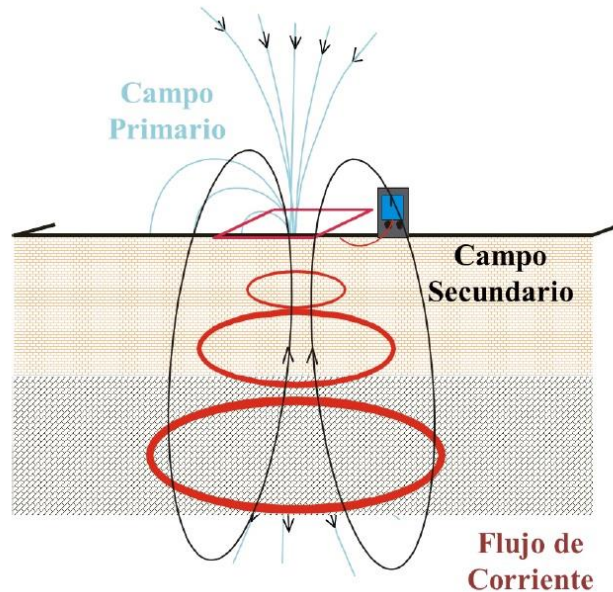


Figura 12. Esquema del funcionamiento del método Transiente Electromagnético TEM (Modificado WalkTEM-Manual, 2015).

La corriente que circula por el transmisor tiene una forma de onda específica, generando un campo magnético primario variable en el tiempo (Figura 13 a). Al cortar la corriente de manera abrupta se ocasiona una inducción electromagnética en el subsuelo, conocida como *corrientes de Eddie* que fluyen en una trayectoria cerrada migrando en profundidad y lateralmente, disminuyendo su intensidad con el tiempo. Durante este proceso ocurre una disminución rápida de la corriente transmitida y, por lo tanto, el campo magnético primario induce una fuerza electromotriz en el subsuelo (Figura 13 b). Estos cortes de corriente generan un campo magnético secundario transitorio que va decreciendo desde la superficie. Este campo secundario, induce un voltaje variable en el tiempo, que corresponde a la medición registrada por el receptor, donde la forma del decaimiento del voltaje contiene información sobre la resistividad del subsuelo, debido a que la magnitud y distribución de las corrientes inducidas dependen de las propiedades eléctricas de las unidades geológicas en profundidad (Figura 13 c). Finalmente, las curvas de resistividad aparente son procesadas y modeladas obteniendo un parámetro de resistividad eléctrica, el cual permite identificar unidades geológicas en profundidad y saturación de agua subterránea.

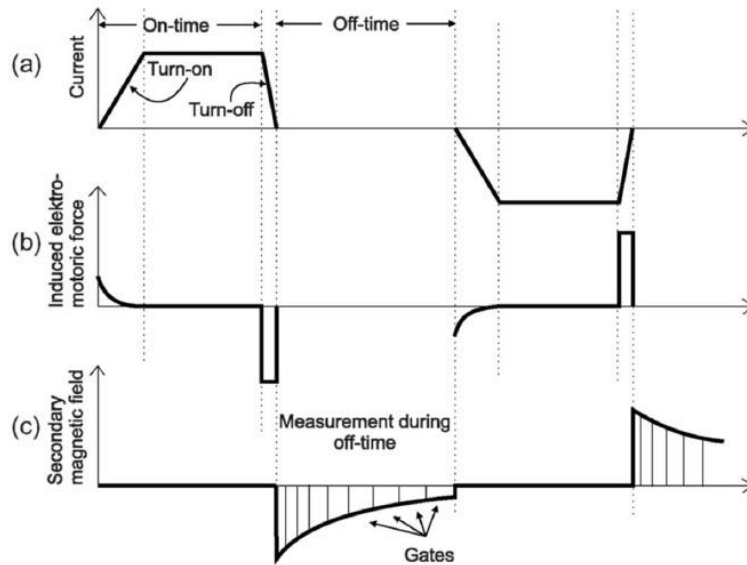


Figura 13. Etapas de medición en TEM: (a) Pulso de transmisión, (b) inducción electromagnética y (c) campo magnético secundario (Modificado ABEM-WalkTEM-Manual 2015).

Para las mediciones en terreno se utilizó un transmisor y dos bobinas receptoras. Dependiendo del espacio disponible para realizar las mediciones, se utilizaron dos tamaños de loop del transmisor:  $40 \times 40 \text{m}^2$  y  $100 \times 100 \text{m}^2$ . La configuración en terreno es loop coincidente, esto corresponde a un arreglo donde el transmisor y la bobina receptora se disponen de modo concéntrico (Figura 14). El procesamiento y modelamiento de los datos, fue realizado utilizando el software de inversión IX1Dv3 de Interpex Limited (IX1Dv3-Manual, 2006).

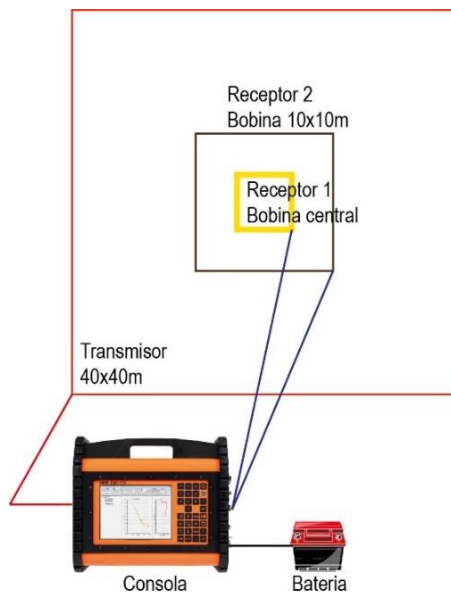


Figura 14. Izquierda: vista en planta de la disposición para la medición de TEM, con la bobina receptora central, la bobina receptora de  $10 \times 10 \text{m}$  y el *loop* del transmisor dispuestos de manera concéntrica. Derecha: medición TEM en recito Ogana de Coyhaique.

### 3.2.2 Perfiles verticales de resistividad eléctrica

De las mediciones de Transiente Electro Magnético, se puede inferir una estratigrafía simplificada en profundidad y el nivel estático. En las mediciones de TEM 1, 3, 4 y 5 (Figura 15, Figura 17, Figura 18, Figura 19), se observa una primera capa de resistividad eléctrica entre 30-70 $\Omega$ m que se interpreta como una capa de sedimentos de origen glacial con abundante contenido de arcillas que se encuentra con alto contenido de agua. Bajo la primera capa, se encuentra una segunda capa de resistividad eléctrica entre 3-15 $\Omega$ m que se interpreta como la capa de sedimentos de origen glacial saturada de agua. Por lo tanto, el techo de esta segunda capa indica la profundidad del nivel estático. Finalmente, en la base de estas mediciones de TEM, se encuentra una tercera capa de resistividad eléctrica entre 0.3-5 $\Omega$ m que se interpreta como las lutitas de la Fm. Katterfeld saturadas de agua.

La medición del TEM 2 (Figura 16), muestra una capa superior de resistividad eléctrica de 81 $\Omega$ m que se interpreta como una capa de sedimentos de origen glacial con abundante contenido de arcillas que se encuentra con alto contenido de agua. Bajo la primera capa, se encuentra una segunda capa de resistividad eléctrica de 16 $\Omega$ m que se interpreta como la capa de sedimentos de origen glacial saturada de agua. Bajo la segunda capa se observa un aumento en la resistividad eléctrica (136  $\Omega$ m), que sugiere la presencia de intrusivos en profundidad, los cuales no permiten identificar las lutitas de la Fm. Katterfeld y que suben la resistividad eléctrica respecto de las otras mediciones de TEM.

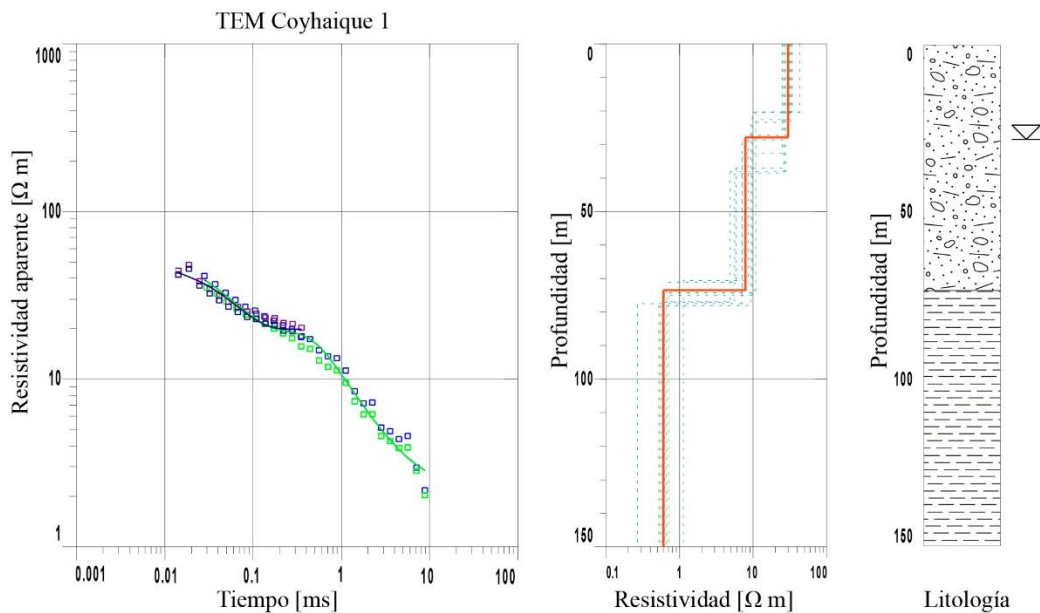


Figura 15. Medición de Transiente Electromagnético 1 en Coyhaique. Coordenadas UTM: 730442E, 4947951N - Datum: WGS84 zona18S. Loop transmisor 40x40m<sup>2</sup>.



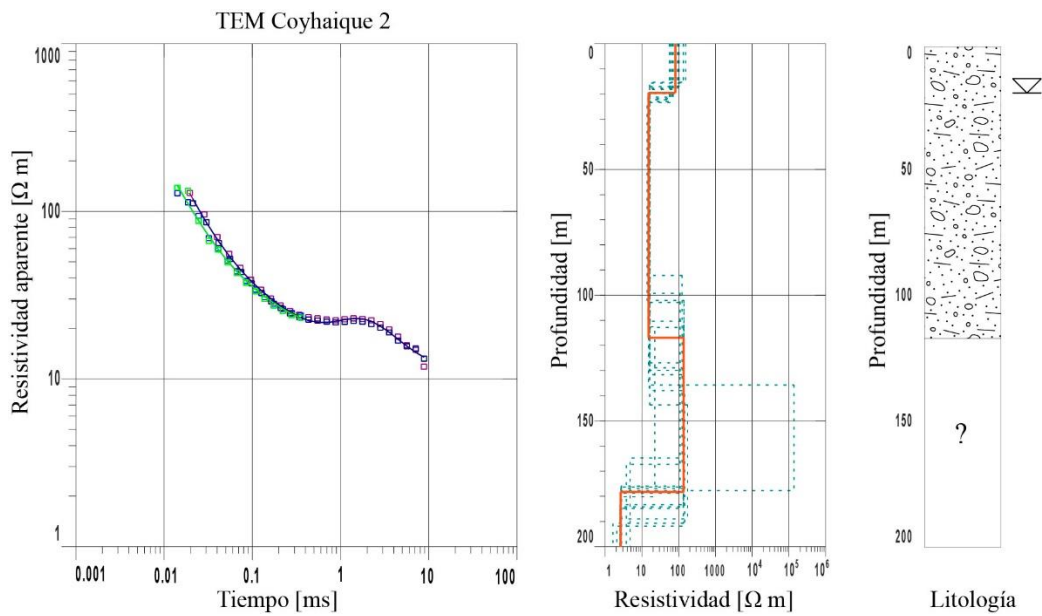


Figura 16. Medición de Transiente Electromagnético 2 en Coyhaique. Coordenadas UTM: 728197E, 4949839N - Datum: WGS84 zona18S. Loop transmisor 100x100m<sup>2</sup>.

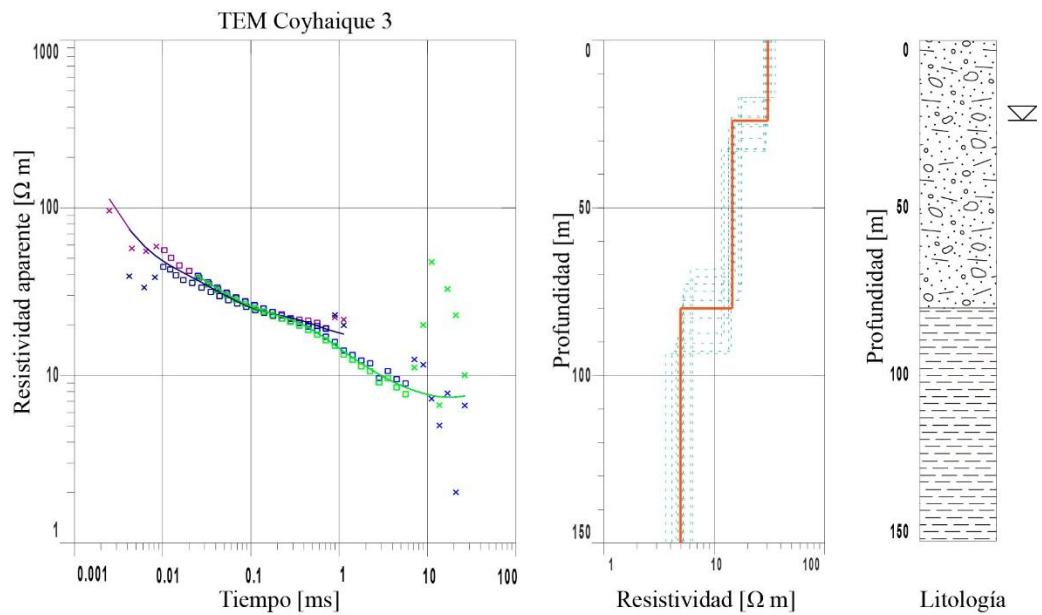


Figura 17. Medición de Transiente Electro Magnético 3 en Coyhaique. Coordenadas UTM: 730367E, 4948839N - Datum: WGS84 zona18S. Loop transmisor 40x40m<sup>2</sup>.

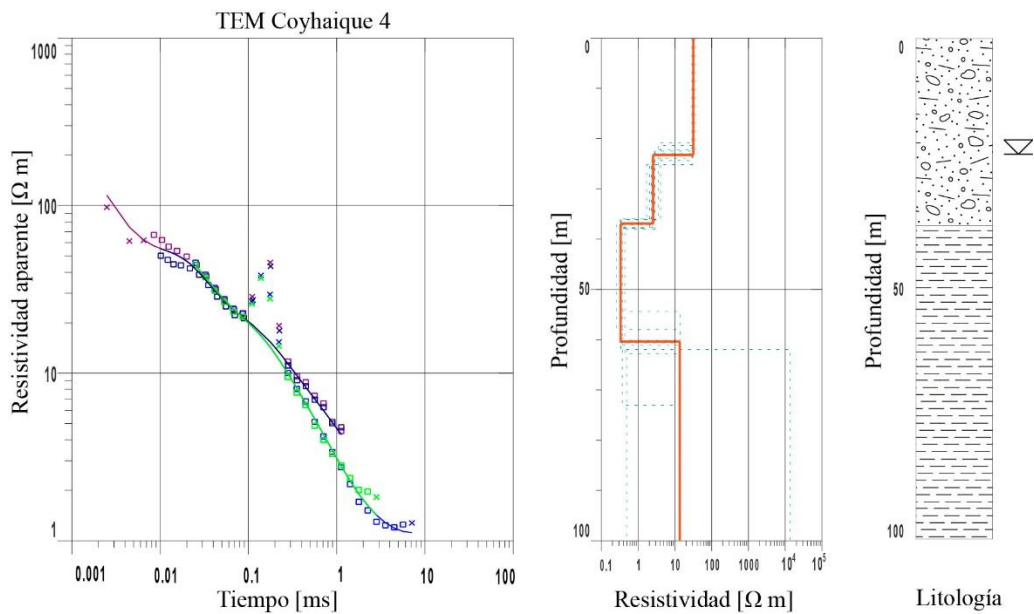


Figura 18. Medición de Transiente Electromagnético 4 en Coyhaique. Coordenadas UTM: 729526E, 4949211N - Datum: WGS84 zona18S. Loop transmisor 40x40m<sup>2</sup>.

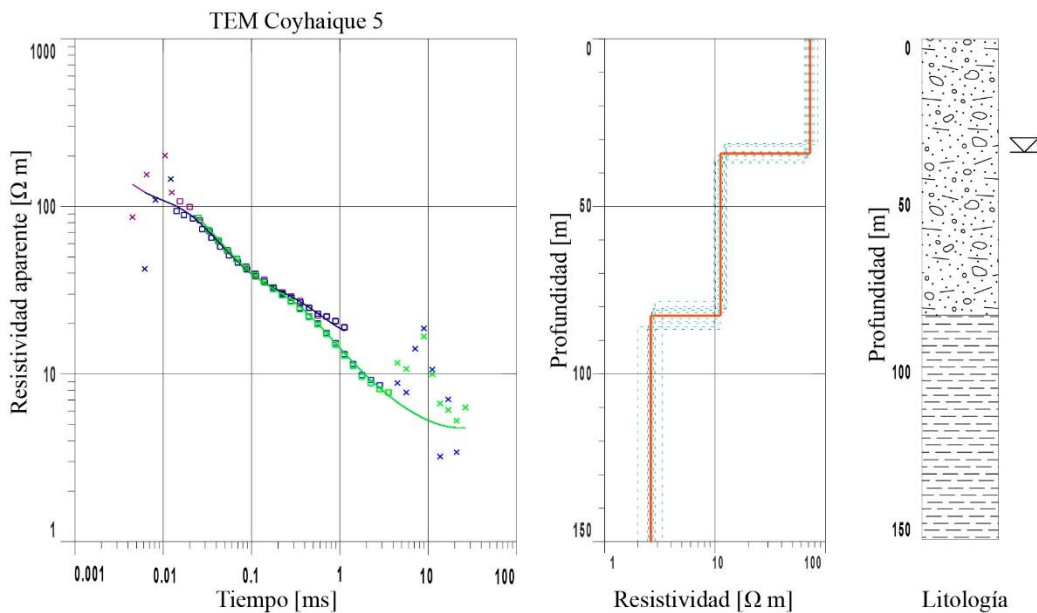


Figura 19. Medición de Transiente Electromagnético 5 en Coyhaique. Coordenadas UTM: 728422E, 4948556N - Datum: WGS84 zona18S. Loop transmisor 40x40m<sup>2</sup>.

### 3.3 Temperatura y nivel estático en pozos para captar agua subterránea

El registro de temperatura, nivel estático y conductividad eléctrica en pozos fue realizado con la sonda Solinst 107 TLC (Figura 20). Las mediciones se hicieron introduciendo la sonda al interior de los pozos para medir cada 1m en el volumen saturado de agua.



Figura 20. Medición de temperatura y nivel estático en pozos para captar agua subterránea.

El registro de temperatura de los pozos Coyhaique Alto, Relleno Sanitario y Club de Leones Coyhaique indican que la temperatura del agua subterránea bajo la ciudad de Coyhaique y sus alrededores de  $\sim 10^{\circ}\text{C}$  (Figura 21). Esta temperatura, es la temperatura del subsuelo, si se asume equilibrio térmico entre las unidades geológicas del subsuelo y el agua subterránea. Finalmente, el perfil de temperatura en el pozo relleno Sanitario, muestra un gradiente de temperatura conductivo que indica un bajo efecto de advección de calor por flujo lateral de agua subterránea y entonces sugiere una baja conductividad hidráulica de rocas y sedimentos.

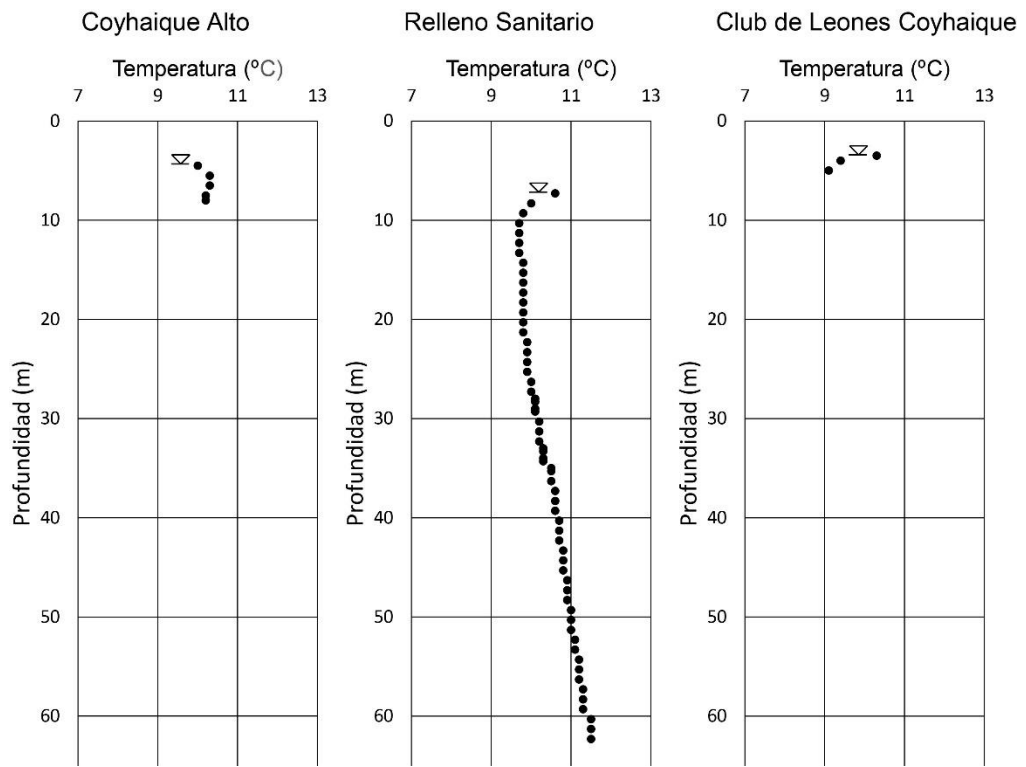


Figura 21. Medición de temperatura y nivel estático en pozos para captar agua subterránea, en la ciudad de Coyhaique y sus alrededores.

## 4. Propiedades físicas de rocas y sedimentos

Las propiedades hidráulicas y térmicas de un medio poroso, controlan la transferencia de agua subterránea y calor, respectivamente. Por un lado, estas propiedades fueron medidas para las rocas del basamento rocoso en el área de interés. Por otro lado, para la cobertura de sedimentos en el área de interés, estas propiedades fueron estimadas en base a su origen sedimentario. Para realizar las mediciones de propiedades hidráulicas y térmicas en el basamento rocoso, se recolectaron muestras de las 4 litologías que se encuentran bajo la ciudad de Coyhaique, en afloramientos representativos para cada litología (Figura 22).

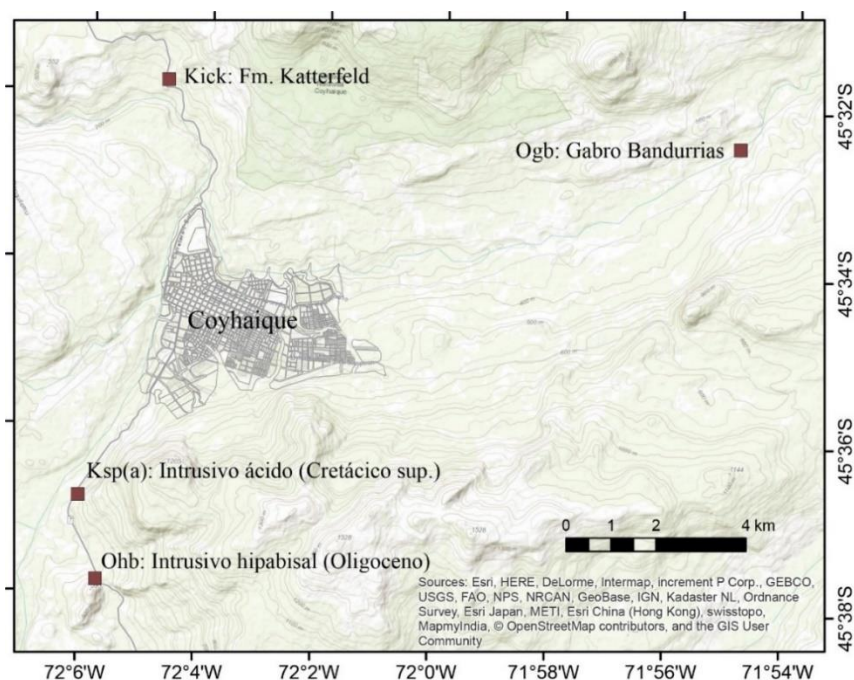


Figura 22. Ubicación de las muestras de roca para la medición de propiedades hidráulicas y térmicas en las rocas que constituyen el basamento rocoso en la ciudad de Coyhaique.

Las diferentes muestras de roca fueron analizadas en el Centro de Excelencia de Los Andes (CEGA), ubicado en el departamento de Geología de la Universidad de Chile y en el Institute of Geoscience de la Friedrich-Schiller University Jena (Tabla 3).

Tabla 3. Ubicación de las muestras para la medición de propiedades hidráulicas y térmicas en las rocas que constituyen el basamento rocoso en la ciudad de Coyhaique. Se señala el lugar donde se realizaron las mediciones de laboratorio.

Unidad geológica	Muestra	UTM N	UTM E	Medición prop. hidráulica	Medición prop. térmica
Fm. Katterfeld (Cretácico inf.)	CoyKat_1	4944659	725948	U Chile	JENA
Fm. Katterfeld (Cretácico inf.)	CoyKat_4	4944659	725948	JENA/U Chile	JENA/U Chile
Fm. Katterfeld (Cretácico inf.)	CoyKat_6	4944659	725948	U Chile	JENA
Fm. Katterfeld (Cretácico inf.)	CoyKat_12	4944659	725948	U Chile	JENA
Fm. Katterfeld (Cretácico inf.)	CoyKat_14	4944659	725948	U Chile	JENA
Intrusivo ácido (Cretácico sup.)	Kspa_1	4944659	725948	JENA	JENA
Intrusivo hipabisal (Oligoceno)	Ohb_1	4942868	726502	JENA	JENA
Gabro bandurrias (Oligoceno)	Ogb_1	4952885	272283	JENA	JENA

## 4.1 Propiedades hidráulicas

Las propiedades hidráulicas necesarias para modelar la transferencia de agua subterránea son la porosidad y conductividad hidráulica.

### Porosidad

La porosidad de un material es la fracción que corresponde a un espacio de poro. En términos cuantitativos, la porosidad  $n$  se define de la siguiente manera:

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad 3$$

Donde,  $V_v$  es el volumen de vacío en el total de material  $V_t$ . La porosidad es adimensional en el rango  $0 \leq n \leq 1$ . Para este trabajo, la porosidad de rocas y sedimentos es estimado de acuerdo al tipo de sedimento.

### Conductividad hidráulica

Darcy (1856), descubrió que el caudal que pasa a través de medio es proporcional a la diferencia de carga hidráulica  $\Delta h$  [m] e inversamente proporcional a la distancia que recorre el agua en el medio  $\Delta l$  [m].

$$Q \propto \Delta h \quad \& \quad Q \propto \frac{1}{\Delta l} \quad 4$$

Además, el caudal de agua  $Q$  [m<sup>3</sup>/s] que pasa a través de un medio es proporcional a la sección transversal que atraviesa  $A$  [m<sup>2</sup>]. Combinando las observaciones descritas y escribiendo la ecuación de forma diferencial, la Ley de Darcy unidimensional se puede escribir de la siguiente manera:

$$Q = -K \frac{dh}{dl} \cdot A \quad 5$$

Donde  $Q$  es la descarga en la dirección  $l$  [m<sup>3</sup>/s]. La constante de proporcionalidad  $K$  [m/s] es la conductividad hidráulica en la dirección  $l$ , la cual es una propiedad del material. La conductividad hidráulica es una medida de la facilidad con la cual un medio transmite el agua. Materiales con valores altos de conductividad hidráulica transmiten agua más fácilmente que materiales con valores bajos.

La conductividad hidráulica de las rocas consideradas en este trabajo, se determinó a partir de la permeabilidad intrínseca, la cual se describe a continuación.

## Permeabilidad intrínseca

La conductividad hidráulica  $K$  es un parámetro específico para el flujo de agua dulce a través de un medio. La permeabilidad intrínseca  $k$  [ $m^2$ ], es independiente de las propiedades del fluido y, por lo tanto, solo depende del medio. Estos parámetros se relacionan de la siguiente manera (Hubbert, 1940):

$$k = \frac{K\mu}{\rho_w g} \quad 6$$

Donde,  $\mu$  es la viscosidad dinámica 0,001308 [ $kg/m \cdot s$ ] para el agua dulce a  $10^\circ C$ ,  $\rho_w$  es la densidad del agua 1000 [ $kg/m^3$ ] y  $g$  es la aceleración de gravedad  $\sim 9,8$  [ $m/s^2$ ].

### 4.1.1 Medición de permeabilidad

Para medir la permeabilidad intrínseca se ocupa el TinyPerm II de NER (Figura 23). El TinyPerm II, es un permeámetro de aire portable, que permite realizar mediciones en el campo (afloramientos) o en laboratorio (muestras de mano). El equipo está compuesto por un pistón, que consiste en una cámara de caucho, la cual se presiona contra la roca y un émbolo que se presiona para producir vacío en la cámara. Un cable conecta el pistón con el controlador del equipo. Mientras se extrae aire de la muestra de roca a la cámara de caucho al vacío, el controlador del equipo registra la variación del volumen de aire dentro de la cámara y calcula la función de respuesta del sistema muestra/instrumento (TinyPerm-Manual, 2013). La función de respuesta se relaciona directamente con la permeabilidad de la muestra de acuerdo a la carta de calibración (Figura 23) (TinyPerm-Calibración, 2013).

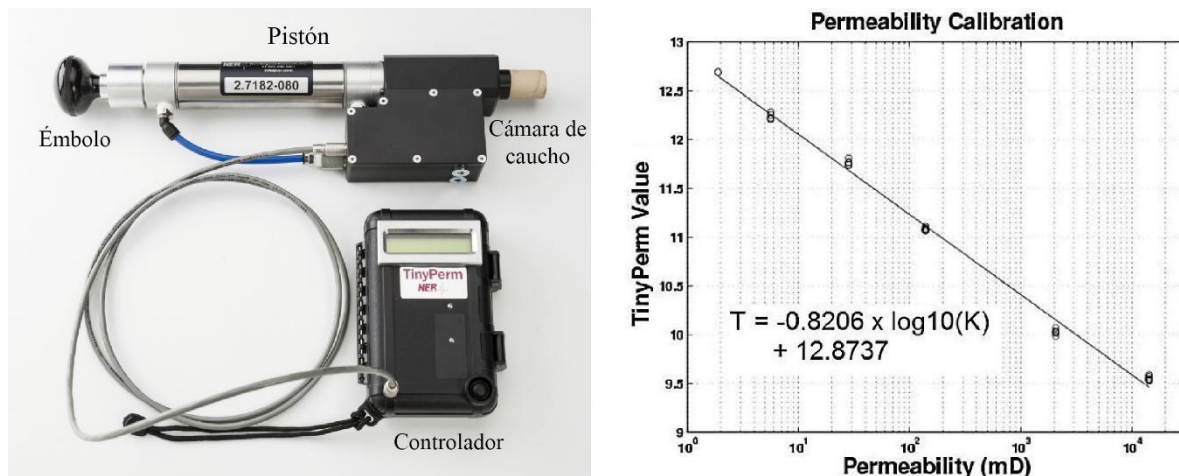


Figura 23. TinyPerm II de NER. Izquierda: componentes del equipo. Derecha: carta de calibración del equipo. (Modificado de TinyPerm-Manual 2013; TinyPerm-Calibración 2013).

Junto a la carta de calibración (TinyPerm-Calibración, 2013), se entrega una ecuación para estimar la permeabilidad  $k$  [mD]:

$$T = -0,8206 \cdot \log_{10}(k \text{ [mD]}) + 12,8737 \quad 7$$

La ecuación 7 se reescribe, para obtener una expresión permeabilidad  $k$ :

$$k \text{ [mD]} = 10^{\left(\frac{T-12,8727}{-0,8206}\right)} \quad 8$$

Para obtener la permeabilidad  $k$  [ $m^2$ ], a partir de la permeabilidad  $k$  [mD], se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$k[m^2] = \frac{9,87 \cdot 10^{-13}}{1000} \cdot k[mD] \quad 9$$

Finalmente, con el valor de permeabilidad  $k$  [ $m^2$ ] se puede obtener la conductividad hidráulica  $K$  [m/s] reescribiendo la ecuación 9 de la siguiente manera:

$$K = \frac{k \cdot \rho_w \cdot g}{\mu} \quad 10$$

Donde,  $K$  es conductividad hidráulica [m/s],  $k$  es permeabilidad [ $m^2$ ],  $\rho_w$  es la densidad del agua 1000 [ $kg/m^3$ ],  $g$  es la aceleración de gravedad 9,8 [ $m/s^2$ ] y  $\mu$  es la viscosidad dinámica 0,001308 [ $kg/m \cdot s$ ], para el agua a 10°C.

Se realizan mediciones de permeabilidad de las muestras de roca con el TinyPerm II de NER, en el Institute of Geoscience de la Friedrich-Schiller University Jena por Florian Schäfer y en el Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA), en Departamento de Geología de la Universidad de Chile (Figura 24).

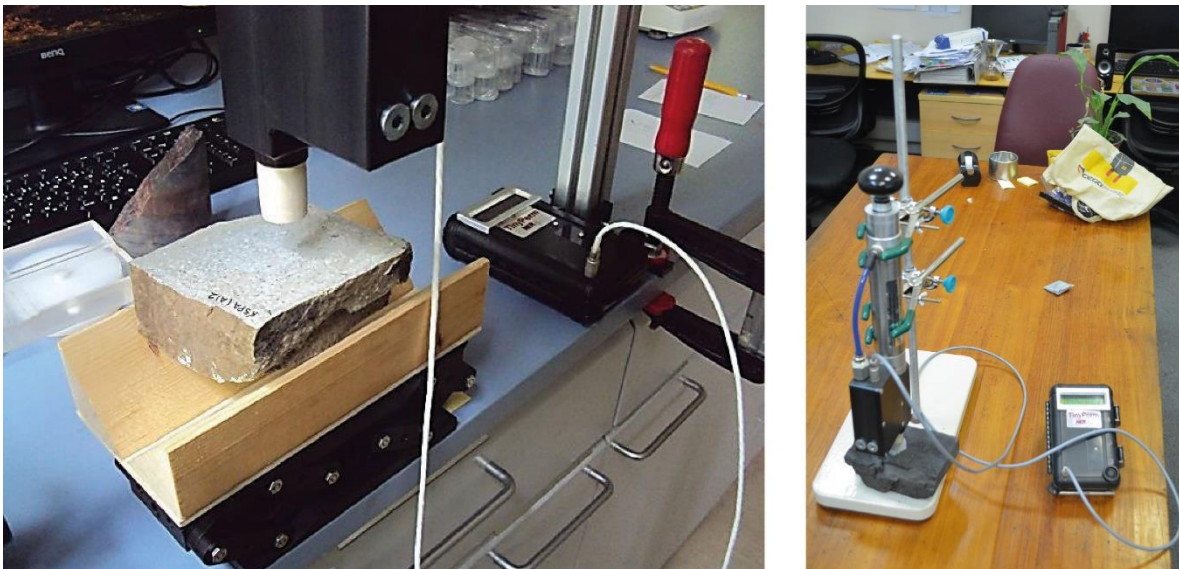


Figura 24. Medición de permeabilidad con el TinyPerm II de NER. Izquierda: medición en el Institute of Geoscience de la Friedrich-Schiller University Jena. Derecha: medición en el Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA), en Departamento de Geología de la Universidad de Chile.



#### 4.1.2 Resumen propiedades hidráulicas

La conductividad hidráulica de las rocas que constituyen el basamento rocoso en la ciudad de Coyhaique indica que son impermeables o semipermeables (Tabla 4). En particular, las lutitas de la Fm. Katterfeld (constituyente principal del basamento rocoso de la ciudad de Coyhaique) tienen conductividad hidráulica entre  $1,2 \cdot 10^{-6}$  y  $2,64 \cdot 10^{-8}$  [m/s]. Para el resto de las rocas del basamento rocoso, la conductividad hidráulica está entre  $1,01 \cdot 10^{-5}$  y  $6,47 \cdot 10^{-7}$  [m/s] (Tabla 4).

Tabla 4. Propiedades hidráulicas de las rocas que constituyen el basamento rocoso en la ciudad de Coyhaique.

Muestra de roca	Valor Tiny perm	Permeabilidad mD	Permeabilidad m <sup>2</sup>	Conductividad hidráulica m/s	Permeabilidad
CoyKat_4	12,42	3,57	3,53E-15	2,64E-08	impermeable
CoyKat_4	11,69	27,70	2,73E-14	2,05E-07	impermeable
CoyKat_6	10,46	873,74	8,62E-13	6,46E-06	semipermeable
CoyKat_12	11,06	162,26	1,60E-13	1,20E-06	semipermeable
Kspa_1	11,28	87,52	8,64E-14	6,47E-07	impermeable
Ohb_1	10,46	873,74	8,62E-13	6,46E-06	semipermeable
Ogb_1	10,30	1368,87	1,35E-12	1,01E-05	semipermeable

Los valores altos de conductividad hidráulica pueden ser debido a la medición en pequeñas fracturas de la roca. Entonces, el valor de conductividad hidráulica de la matriz rocosa debe ser más cercano a los valores bajos de conductividad hidráulica que fueron medidos. El detalle de las mediciones se encuentra en la Tabla A-19 de los Anexos.

#### 4.2 Propiedades térmicas

La conductividad térmica  $\lambda$ , difusividad térmica  $\alpha$  y el calor específico  $c$ , son propiedades físicas importantes que controlan procesos geotérmicos. En la corteza terrestre, el calor se transfiere por conducción, advección y radiación. Sin embargo, la radiación es efectiva solo a altas temperaturas (Lowrie, 2007).

La conductividad térmica  $\lambda$  [W/m·°C] es la capacidad de transportar calor a través de un medio. De acuerdo a la ley de Fourier, el flujo de calor  $q$  [W/m<sup>2</sup>] se relaciona con el gradiente de temperatura  $dT/dx$  [K/m] mediante la conductividad térmica de la siguiente manera:

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad 11$$

La difusividad térmica  $\alpha$  [m<sup>2</sup>/s] se relaciona con la conductividad térmica, el calor específico  $c$  [J/kg·K] y la densidad  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] de la siguiente manera:

$$\alpha = \lambda \cdot \frac{dT}{dt} \quad 12$$

Finalmente, el calor específico  $c$  [J/kg·K] se puede estimar a partir de la conductividad térmica, difusividad térmica y densidad:

$$c = \frac{\lambda}{\alpha \cdot \rho}$$

En la corteza continental, también se transfiere calor por advección que consiste en el transporte de calor por flujo de fluidos.

#### 4.2.1 Medición de conductividad y difusividad térmica con Escáner de Conductividad Térmica

La medición de la conductividad térmica y la difusividad se realiza con el Escáner de Conductividad Térmica (TCS) de Lippmann and Rauen GbR (Figura 25) en el *Institute of Geoscience* de la *Friedrich-Schiller University Jena* por Florian Schäfer.

El principio de medición del Escáner de Conductividad Térmica (TCS) es escanear una superficie plana o cilíndrica de una muestra con la "cabeza óptica", la cual contiene una fuente de calor móvil infrarroja y sensores de temperatura en cada extremo (1 sensor frío y 2 sensores calientes) (Figura 25). Durante la medición, la muestra y 2 estándares de conductividad y difusividad térmica conocidas, son calentados en serie: estándar → muestra → estándar y se registran sus variaciones de temperatura. Luego, la conductividad se calcula a partir de la comparación de temperaturas de la muestra y estándares después de ser calentados (TSC-Manual, 2006). Para determinar la difusividad térmica, el segundo sensor caliente (sensor caliente  $\gamma$ ) registra temperatura a 7mm de la línea de medición del Escáner de Conductividad Térmica (TCS-TD-Manual, 2006).

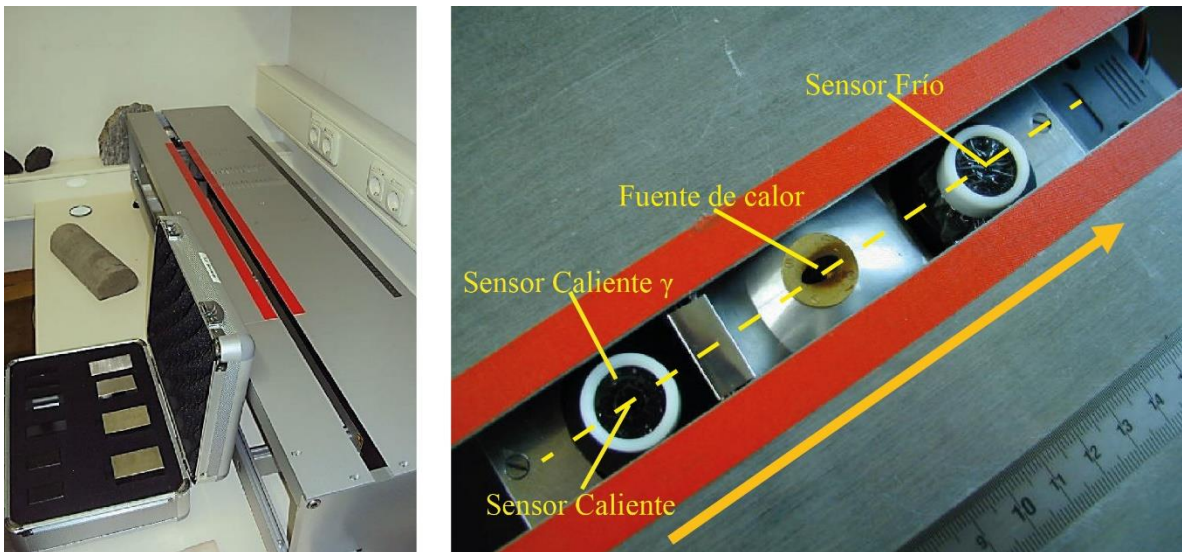


Figura 25. Escáner de Conductividad Térmica (TCS) de Lippmann and Rauen GbR. Izquierda: la plataforma para escanear la muestra y los estándares (sobre la línea roja). Derecha: la "cabeza óptica" compuesta de la fuente de calor móvil y sensores de temperatura en cada lado (la flecha amarilla indica el movimiento de la cabeza óptica).

Antes de la medición, las muestras y los estándares son pintados de negro, en el área donde se realiza la medición. Para pintar de negro las muestras, se ocupa un revestimiento elástico sintético en base a agua, que en este caso es un spray PlastiKote (Figura 26).



Figura 26. Preparación de muestras para medición de conductividad y difusividad térmica con el Escáner de Conductividad Térmica (TCS).

Para determinar la conductividad térmica, la muestra de roca debe tener una conductividad térmica en el rango comprendido entre las conductividades térmicas de los 2 estándares. Para alcanzar una buena calidad de medición, la muestra debe estar ubicada lo más cerca posible de los estándares (TSC-Manual, 2006). Durante el proceso de medición, los cambios de temperatura son registrados por los sensores de temperatura (1 frío y 2 calientes) (Figura 27).

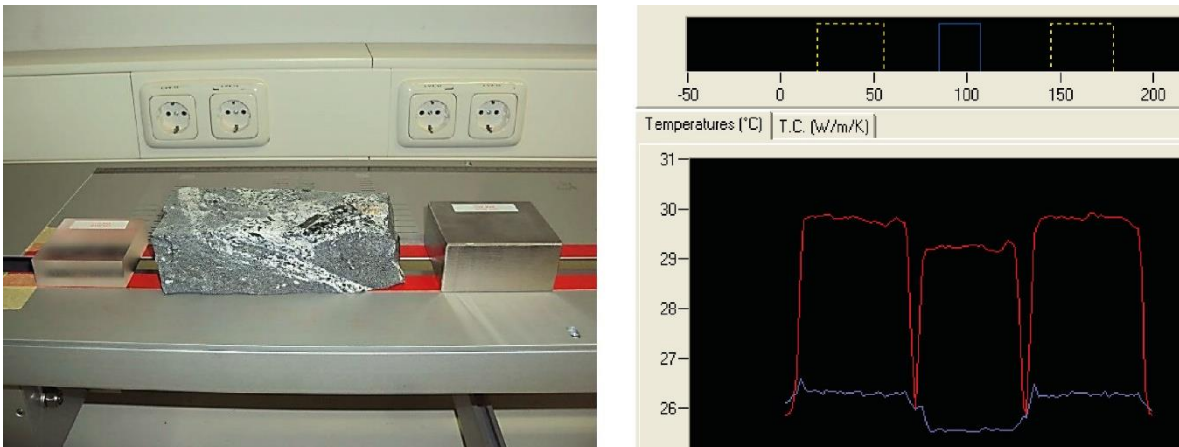


Figura 27. Medición de conductividad y difusividad térmica con el Escáner de Conductividad Térmica (TCS). Izquierda: ubicación de la muestra de roca respecto de los estándares en la plataforma de medición. Derecha: registro de temperaturas: en azul la temperatura antes de calentar y en rojo la temperatura después de calentar.

Durante la medición y para procesar los datos se ocupa el Software incluido en el Escáner de Conductividad Térmica (TCS) (TCS-Software, 2006).

#### 4.2.2 Medición de conductividad térmica con fuente lineal

La medición de la conductividad térmica con el equipo KD2Pro de Decagon Devices se realiza en el departamento de Geología de la Universidad de Chile. Específicamente se utiliza la sonda RK-1, diseñada específicamente para medir conductividad térmica de rocas (Figura 28).



Figura 28. Equipo KD2Pro de Decagon Devices. Izquierda: el equipo de medición con diversas sondas. Derecha: sonda RK1 específica para medir conductividad térmica de rocas.

El principio de medición del KD2Pro es registrar la variación de temperatura a lo largo de una fuente de calor lineal. La sonda entrega calor a una tasa constante y de manera simultánea registra el aumento de temperatura de la muestra de roca, luego se detiene la emisión de calor y se registra la disminución de temperatura de la muestra. Con este registro de temperatura, la consola entrega un valor de conductividad térmica (KD2Pro-Manual, 2016).

Para realizar las mediciones, las muestras de roca se cortan en paralelepípedos de  $\sim 1000$   $\text{cm}^3$  y se perforan con una broca de 4 mm de diámetro. Antes de la medición, la sonda y la perforación se cubren con una pasta conductora de calor, que en este caso es Arctic Alumina Premium (Arctic Silver). Lo anterior, para mejorar la transferencia de calor entre la sonda y la muestra de roca. Finalmente, es recomendable esperar 5-10 minutos antes de medir, para que la sonda y la muestra se equilibren térmicamente antes de comenzar con el proceso de medición.



Figura 29. Medición de conductividad térmica con el equipo KD2Pro en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

### 4.2.3 Resumen de propiedades térmicas

Las propiedades térmicas de las rocas que constituyen el basamento rocoso en la ciudad de Coyhaique (Tabla 5) indican que las lutitas de la Fm. Katterfeld son más conductoras que el resto de las rocas del basamento rocoso. La conductividad térmica de las lutitas de Fm Katterfeld es  $3 \pm 0.6$  [W/m/K]. Por otro lado, la difusividad térmica de las lutitas de Fm Katterfeld es  $1.34 \pm 0.34$  [mm<sup>2</sup>/s]. El resto de las rocas del basamento rocoso en la ciudad de Coyhaique tienen conductividad térmica y difusividad térmica de  $2,2 \pm 0.2$  [W/m/K] y  $1,07 \pm 0,09$  [mm<sup>2</sup>/s], respectivamente. El detalle de las mediciones se encuentra en la Tabla A-20 de los Anexos.

Tabla 5. Propiedades térmicas de las rocas que constituyen el basamento rocoso en la ciudad de Coyhaique.

Muestra	Densidad	Conductividad térmica	Difusividad térmica	Capacidad calórica
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/m/K]	[mm <sup>2</sup> /s]	[J/kg·K]
CoyKat_1	2,13	3,07	1,39	1036
CoyKat_4	2,13	3,75	1,90	928
CoyKat_4	2,13	3,41	-	-
CoyKat_6	2,13	3,14	1,45	1017
CoyKat_12	2,13	2,36	1,07	1036
CoyKat_14	2,13	2,32	1,07	1016
Kspa_1	2,50	2,16	1,08	803
Kspa_2	2,50	2,39	1,17	819
Ohb_1	2,68	2,27	1,07	791
Ogb_1	2,56	1,99	0,95	821

## 5. Carga térmica y demanda energética

Para dimensionar los intercambiadores de calor verticales cerrados y realizar el análisis de transferencia de calor desde y hacia el suelo, es necesario determinar la carga térmica [kW] y demanda energética [kWh] del edificio del Gobierno Regional de Aysén. Para determinar la carga térmica y demanda energética del edificio del Gobierno Regional de Aysén, se utilizó el método de grados-temperatura y condiciones de diseño para edificios institucionales y comerciales de (RETSCreen, 2005). El método determina la carga térmica del edificio para cada intervalo de temperatura (en el exterior del edificio). Posteriormente, la demanda energética se calcula en función del número de horas que se registra cada intervalo de temperatura. Para este trabajo se consideran intervalos de 1°C y se calcula la demanda energética mensual. Para el cálculo de carga térmica, se considera como temperatura de confort de 23°C al interior del edificio en el caso de calefaccionar y refrigerar (RETSCreen, 2005).

### 5.1 Cálculo de carga térmica

Para determinar la carga térmica en función de la temperatura exterior, se utilizan las características físicas del edificio, además del número de usuarios y equipos en el interior del edificio. Debido a lo complejo de determinar la transferencia de calor entre las distintas zonas del edificio y el exterior, se considera al edificio como un bloque de base cuadrada (Figura 30).

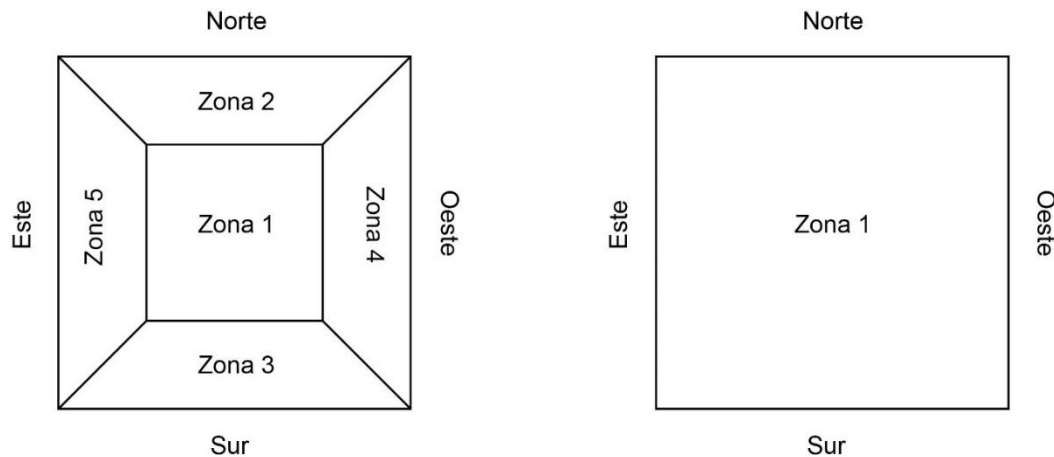


Figura 30. Izquierda: aproximación por zonas para determinar transferencias de calor entre diversos ambientes al interior del edificio. Derecha: simplificación del edificio como 1 bloque de base cuadrada (Modificado de RETSCreen 2005).

Las ganancias o pérdidas de calor pueden ser sensibles o latentes, cuando involucran simples cambios de temperatura o cambios de estado de la materia, respectivamente.

#### 5.1.1 Ganancias o pérdidas por transmisión

Las ganancias o pérdidas por transmisión, consideran la transferencia de calor a través de la envolvente del edificio por la diferencia de temperatura, de la siguiente manera:

$$q_{\text{trans}} = \sum_{i=1}^n U_i \cdot A_i \cdot (T_0 - T_{\text{in}}) \quad 14$$

Donde,  $q_{trans}$  [W] es el flujo de calor a través del elemento  $i$  de la envolvente por la diferencia de temperatura [°C],  $U_i$  es el coeficiente de transferencia térmica del elemento  $i$  [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ],  $A_i$  es área del elemento  $i$  [ $m^2$ ],  $T_0$  es la temperatura exterior [°C] y  $T_{in}$  es la temperatura en el interior del edificio (23°C). En el caso de la transferencia de calor por diferencia de temperatura a través del suelo, se considera un coeficiente de transferencia lineal a través del perímetro del edificio  $U$  lineal [ $W/m \cdot ^\circ C$ ] y el perímetro del edificio [m].

### 5.1.2 Ganancias solares

Para ajustar las ganancias solares al método de grados-temperatura, se considera una relación lineal entre la mínima y máxima ganancia solar, que corresponden a las temperaturas promedio de diseño de invierno  $T_{pc}$  (calefacción) y verano  $T_{pr}$  (refrigeración), respectivamente (Figura 31). La temperatura promedio de diseño de invierno es la temperatura de diseño de invierno más la mitad de la amplitud térmica promedio diaria. Por otro lado, la temperatura promedio de diseño de verano es la temperatura de diseño de refrigeración menos la mitad de la amplitud térmica promedio diaria (RETScreen, 2005).

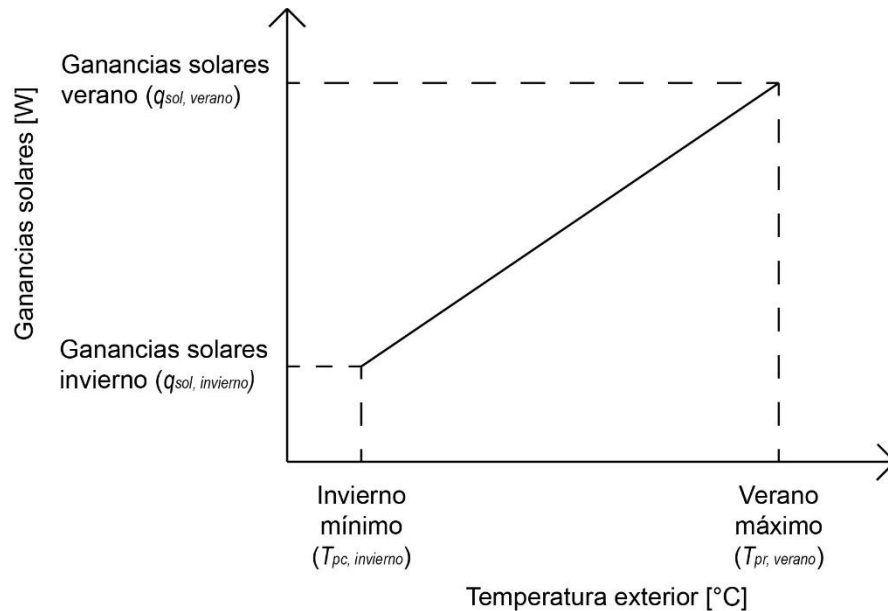


Figura 31. Ganancias solares en función de la temperatura exterior (Modificado de RETScreen 2005).

Se consideran solo las ganancias solares a través de ventanas, las cuales se calculan de la siguiente manera:

$$q_{sol} = S_c [q_{sol, invierno} + M \cdot (T_0 - T_{pc})] \quad 15$$

Donde,  $q_{sol}$  [W] es la ganancia solar por diferencia de temperatura [°C],  $S_c$  [ $m^2$ ] es el área en planta del edificio,  $q_{sol, invierno}$  [ $W/m^2$ ] es la ganancia solar mínima durante el invierno y  $T_{pc}$  [°C] es la temperatura promedio de diseño de invierno. Como se verá más adelante, la temperatura de diseño de calefacción es -3°C y la amplitud térmica promedio es 7,6°C (Castillo, 2001). Finalmente,  $M$  es la pendiente entre la máxima ganancia solar del verano  $q_{sol, verano}$  y la mínima ganancia solar del invierno  $q_{sol, invierno}$ .



$$M = \frac{q_{sol,verano} - q_{sol,invierno}}{T_{pr} - T_{pc}} \quad 16$$

Las ganancias solares de invierno y verano se calculan de la siguiente manera:

$$q_{sol,estación} = \frac{\sum_{ori} (MSHGF_{ori,estación} \cdot AG_{ori} \cdot SC_{ori} \cdot CLF_{tot,ori} \cdot FPS_{estación})}{nh_{estación} \cdot S_c} \quad 17$$

Donde, *ori* es orientación (norte, sur, este y oeste), *estación* es la época del año,  $MSHGF_{ori,estación}$  es la máxima ganancia solar en cada estación, de acuerdo a la orientación y latitud del edificio [W],  $AG_{ori}$  [ $m^2$ ] es el área de las ventanas en cada orientación,  $SC_{ori}$  es el coeficiente de sombra que llega a las ventanas en cada orientación,  $CLF_{tot,ori}$  es factor de utilización de refrigeración, considerando 24 horas de uso para cada orientación,  $FPS_{estación}$  es la fracción posible de luz solar en cada estación y  $nh_{estación}$  es el número de horas que funciona el sistema de climatización en cada estación.

De acuerdo a (ASHRAE, 1985), valores típicos que se pueden asumir son los siguientes:  $SC_{ori}$  0,81;  $FPS_{estación}$  0,64 para verano y 0,45 para invierno;  $nh_{estación}$  es 12 para el verano y 24 para el invierno. Finalmente, se asume que el área de las ventas es igual en cada orientación. Por lo tanto, la ecuación 17 se puede re-escribir de la siguiente manera:

$$q_{sol,estación} = \frac{AG \cdot SC_{ori} \cdot FPS_{estación}}{4 \cdot nh_{estación} \cdot S_c} \cdot \sum_{ori} (MSHGF_{ori,estación} \cdot CLF_{tot,ori}) \quad 18$$

De acuerdo a (ASHRAE, 1985), el factor  $\sum_{ori} (MSHGF_{ori,estación} \cdot CLF_{tot,ori})$ , se puede determinar de la siguiente manera:

Verano:

$$\sum_{ori} (MSHGF_{ori,estación} \cdot CLF_{tot,ori}) = 0,8586x^2 - 33,9x + 10955 \quad 19$$

Invierno:

$$\sum_{ori} (MSHGF_{ori,estación} \cdot CLF_{tot,ori}) = -1,55x^2 + 2,9687x + 12369 \quad 20$$

Donde, x es la latitud en grados decimales.

Para temperaturas inferiores a  $T_{pc}$ , no se consideran ganancias solares y para temperaturas superiores a  $T_{pr}$ , se considera el máximo de ganancia solar.

### 5.1.3 Ganancias internas sensibles

Se considera el uso de luces y equipos eficientes en el consumo energético y, por lo tanto, con bajas emisiones de calor. Entonces, la ganancia por luces es  $5\text{W}/\text{m}^2$  y las ganancias por equipos es  $5\text{W}/\text{m}^2$  (ASHRAE, 1985). Por otro lado, se considera una ganancia de calor sensible por ocupante del edificio de  $74,6\text{ W}$  por persona.

### 5.1.4 Ganancias o pérdidas sensibles por renovaciones de aire

Las ganancias o pérdidas sensibles de calor por renovaciones de aire son proporcionales a la cantidad de ocupantes del edificio y se determinan de la siguiente manera:

$$q_{\text{aire,sensible}} = \rho_{\text{aire}} \cdot c_p \cdot \dot{V} \cdot (T_{\text{in}} - T_0) \quad 21$$

Donde,  $q_{\text{aire,sensible}}$  [ $\text{W}/^\circ\text{C}$ ] es la ganancia o pérdida sensible por renovación de aire por diferencia de temperatura,  $\rho_{\text{aire}}$  es la densidad del aire ( $1,2\text{ kg}/\text{m}^3$ ),  $c_p$  es la capacidad calorífica del aire ( $1,005\text{kJ}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$ ),  $T_0$  [ $^\circ\text{C}$ ] es la temperatura exterior y  $T_{\text{in}}$  [ $^\circ\text{C}$ ] es la temperatura en el interior del edificio. Finalmente, las renovaciones de aire son 10 litros por persona por segundo [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] por persona (ASHRAE, 1985).

### 5.1.5 Ganancias o pérdidas latentes por renovaciones de aire

Las ganancias o pérdidas latentes de calor por renovaciones de aire son una fracción de las pérdidas sensibles de calor por renovaciones de aire y se calculan de la siguiente manera:

$$q_{\text{aire,latente}} = [a \cdot T_0 + b] \cdot q_{\text{aire,sensible}} \quad \text{para} \quad T_0 \geq 10^\circ\text{C} \quad 22$$

$$q_{\text{aire,latente}} = 0 \quad \text{para} \quad T_0 < 10^\circ\text{C} \quad 23$$

Donde,  $[a \cdot T_0 + b]$  es un factor adimensional que depende de la temperatura exterior. Por otro lado,  $a$  y  $b$  son factores que se calculan de la siguiente manera:

$$a = \frac{f_{\text{max}} - f_{\text{min}}}{DT} \quad 24$$

$$b = f_{\text{min}} - \left( \frac{T_{d,\text{ref}} - DT}{DT} \right) \cdot (f_{\text{max}} - f_{\text{min}}) \quad 25$$

Donde, las fracciones máximas ( $f_{\text{max}}$ ) y mínimas ( $f_{\text{min}}$ ) de pérdidas o ganancias latentes por renovaciones de aire son 1,5 y 0,1, respectivamente. Lo anterior, considera una humedad del aire intermedia (RETScreen, 2005).  $DT$  es  $30^\circ\text{C}$  el rango de temperaturas de diseño (RETScreen, 2005). Finalmente,  $T_{d,\text{ref}}$  es la temperatura de diseño de refrigeración de  $25^\circ\text{C}$ .

### 5.1.6 Ganancias internas latentes

Se consideran como ganancias internas latentes, solo las que se generan por ocupantes del edificio de  $74,6\text{ W}$  por persona.

## 5.2 Cálculo de demanda energética

Para estimar la demanda energética, se considera la carga térmica para cada intervalo de temperatura [kW] y el número de horas que se registran los intervalos de temperatura [h] en un periodo de tiempo [kWh]. En este trabajo, se consideran intervalos de temperatura de 1°C y periodos mensuales. Por lo tanto, la demanda energética se calcula como la sumatoria de las demandas energéticas asociadas a cada intervalo de temperatura para cada mes del año. La Figura 32 muestra las fuentes de información para estimar la demanda energética en el caso de calefacción.

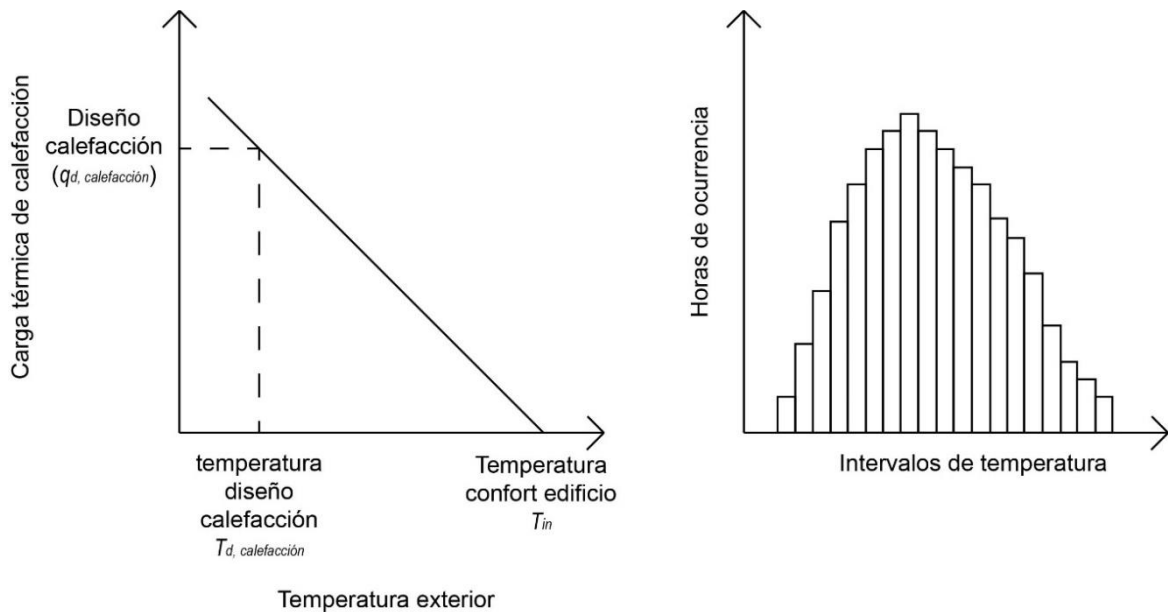


Figura 32. Izquierda: cargas térmicas de calefacción entre la temperatura de diseño de calefacción y la temperatura de confort al interior del edificio. Derecha: Registro de intervalos de temperatura para los cuales se requiere calefacción (Modificado de RETScreen 2005).

Como se verá más adelante, para la ciudad de Coyhaique las temperaturas de diseño de calefacción y refrigeración son  $-3^{\circ}\text{C}$  y  $25^{\circ}\text{C}$ , respectivamente.

## 5.3 Bomba de calor geotérmica

### 5.3.1 Funcionamiento de la bomba de calor geotérmica

Una bomba de calor transfiere el calor entre el sistema de distribución de calor y/o frío y el intercambiador de calor subterráneo. Es la unidad básica de un sistema BCG. Una bomba de calor opera usando el mismo ciclo que un refrigerador. La bomba de calor utiliza la compresión y expansión de un fluido de trabajo para dirigir el flujo de calor entre el interior del edificio y el intercambiador de calor subterráneo. De acuerdo a la segunda ley de la termodinámica, el calor fluye sólo hacia donde hay menor temperatura. Sin embargo, una bomba de calor es capaz de extraer calor de la tierra a una temperatura de, por ejemplo 10°C, y utilizarla para calentar un ambiente hasta 23°C.

Para explicar el funcionamiento de una bomba de calor se hará referencia a la Figura 33. En modo de calefacción, la bomba de calor trabaja de la siguiente manera:

- 1-2: El calor que proviene del subsuelo se transfiere al fluido de trabajo por medio de un intercambiador de calor llamado evaporador. Este fluido de trabajo es un refrigerante que se encuentra en estado líquido saturado y a una temperatura más fría que la fuente geotermal, de forma que existe un flujo de calor hacia él. Este calor evapora y sobrecalienta al refrigerante, aumentando ligeramente su temperatura.
- 2-3: El fluido de trabajo en estado gaseoso con baja presión y temperatura, pasa por un compresor eléctrico, el cual aumenta la presión del refrigerante y, en consecuencia, sube su temperatura. Este nuevo producto es el fluido de servicio para un segundo intercambiador de calor llamado condensador.
- 3-4: El fluido que distribuirá el calor hacia el edificio fluye por el condensador. Debido a que el fluido de trabajo se encuentra a una temperatura mayor que el interior del edificio, el fluido de trabajo transfiere al interior del edificio. En este paso, a medida que el fluido de trabajo pierde calor se condensa.
- 4-1: El fluido de trabajo, líquido con alta presión y temperatura, pasa por una válvula de expansión. La válvula reduce la presión del fluido de trabajo y, en consecuencia, baja su temperatura. Finalmente, este líquido de baja temperatura y presión fluye hacia el evaporador, cerrando y comenzando nuevamente el ciclo.

De esta manera el calor proveniente del subsuelo se transfiere hacia el interior del edificio.

Una diferencia importante entre un refrigerador y una BCG, es que la última puede ser reversible. Esto es, cuando se quiere enfriar un ambiente, el intercambiador de calor entre el fluido de trabajo y la fuente geotermal adopta el rol de condensador, y el intercambiador de calor entre el fluido de trabajo y el fluido interior se transforma en evaporador. Esto se logra por medio de una válvula reversible en la bomba de calor y, entonces, el ciclo de refrigeración tiene el siguiente sentido en la Figura 33: Intercambiador de calor sistema de climatización → compresor → Intercambiador de calor colector geotérmico → Válvula de expansión, cerrando y comenzando nuevamente el ciclo.

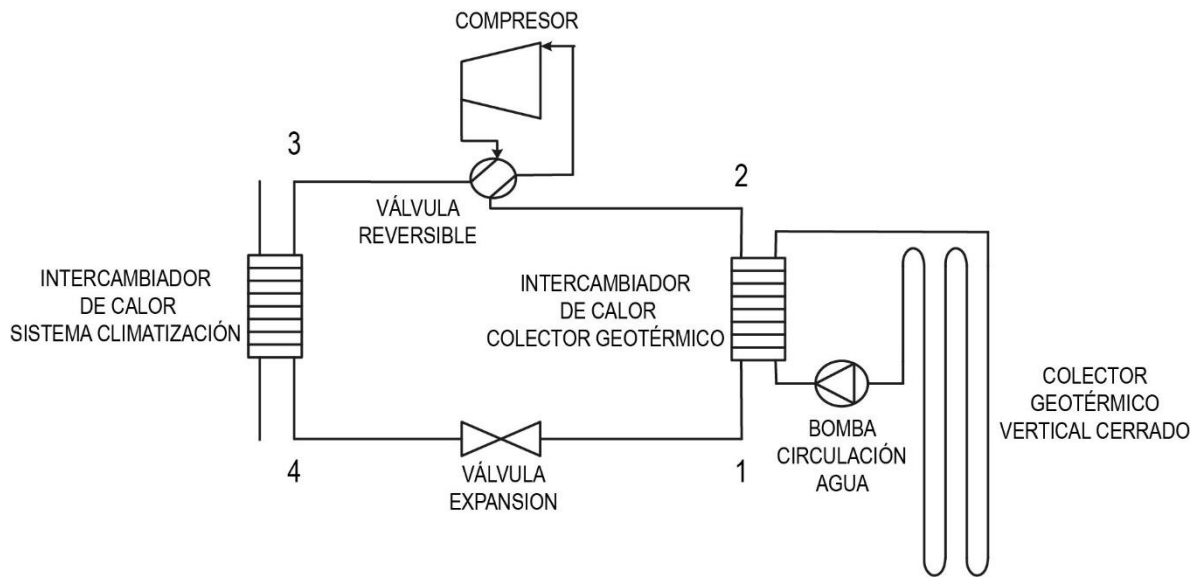


Figura 33. Esquema del ciclo termodinámico de una bomba de calor típica con colectores geotérmicos verticales cerrados (Modificado de Self et al., 2013).

La eficiencia de la bomba de calor *COP* (por sus siglas del inglés, Coefficient Of Performance), es el cociente entre la energía que se desea conseguir,  $Q_{\text{condensador}}$  en invierno y  $Q_{\text{evaporador}}$  en verano, y la energía que se debe aportar en el compresor para conseguirlo,  $W$ :

$$\text{COP}_{\text{calefacción}} = \frac{Q_{\text{condensador}}}{W} \quad 26$$

$$\text{CCOP}_{\text{refrigeración}} = \frac{Q_{\text{evaporador}}}{W} \quad 27$$

Para predecir la eficiencia de la bomba de calor geotérmica, antes de su operación, existen diversas aproximaciones. Sin embargo, en este trabajo se ocuparán valores de eficiencia de acuerdo a catálogos de bombas de calor que han sido certificadas y cumplen con estándares de eficiencia que permiten consultar y comprar los equipos.

Cuando la bomba de calor funciona con propósitos de calefaccionar ambientes, la potencia que se extrae del suelo durante el funcionamiento de la BCG es la potencia que requiere el edificio  $Q_{\text{condensador}}$  menos la potencia que aporta el compresor de la bomba  $W$ :

$$Q_{\text{extrac\_suelo}} = Q_{\text{condensador}} - W \quad 28$$

Cuando la bomba de calor funciona con propósitos de refrigerar ambientes, la potencia que se disipa en el suelo durante el funcionamiento de la BCG es la potencia que se extrae del edificio  $Q_{\text{evaporador}}$  más la potencia que aporta el compresor de la bomba  $W$ :

$$Q_{\text{disipa\_suelo}} = Q_{\text{evaporador}} + W \quad 29$$

### 5.3.2 Rendimiento de la bomba de calor geotérmica

Como se mencionó anteriormente, el rendimiento de calefacción  $COP_{calefacción}$  es una medida de la potencia térmica que entrega la bomba de calor en función de la potencia eléctrica que consume el compresor del equipo (ecuación 26). Por otro lado, el rendimiento de refrigeración  $COP_{refrigeración}$  es una medida de la potencia térmica que extrae la bomba de calor en función de la potencia eléctrica que consume el compresor del equipo (ecuación 27).

En este trabajo, el rendimiento de la bomba de calor fue tomado considerando diversos catálogos de bomba de calor, que indican el valor medido del rendimiento de acuerdo a estándares internacionales. El rendimiento se determina considerando un sistema de calefacción/refrigeración por losa radiante/cielo radiante, porque son más eficientes en el caso de climatizar con bombas de calor geotérmicas (Sarbu and Sebarchievici, 2016b).

Para el caso de calefacción el  $COP_{calefacción}$  B0/W35<sup>3</sup> está entre 4.2 y 4.5 (e.g. Dimplex-SI130TUR+ 2017; Waterkotte-DS112500T 2017) de acuerdo a la normativa EN 14511. Por otro lado, para el caso de refrigeración el  $COP_{refrigeración}$  B20/W9<sup>4</sup> tiene un valor típico de 5.6 (e.g. Dimplex-SI130TUR+, 2017). Estos valores para el rendimiento de las bombas de calor geotérmicas son consistentes con valores reportados en la literatura (Sarbu and Sebarchievici, 2016a).

### 5.4 Carga térmica edificio del Gobierno Regional de Aysén

En este trabajo se considera el edificio del Gobierno Regional de Aysén, para realizar el análisis técnico y económico de implementar bombas de calor geotérmicas con intercambiadores de calor verticales cerrados en la ciudad de Coyhaique. Lo anterior, porque este edificio cumple buenos estándares de eficiencia energética y se considera representativo de las nuevas edificaciones en la ciudad.

El edificio del Gobierno Regional de Aysén, tiene 2600 m<sup>2</sup> construidos y 5 pisos, de los cuales el piso inferior se encuentra parcialmente enterrado. Siguiendo estándares de construcción de edificios eficientes (RETScreen, 2005), se considera que cada piso tiene 3m de altura y que el piso inferior tiene al menos 1 m de profundidad enterrado. En el edificio trabajan 114 personas.

Tal como se mencionó en la metodología para estimar la carga térmica, el edificio se considera como un bloque de base cuadrada. Los coeficientes de transferencia térmica, fueron estimados considerando el estándar de eficiencia energética para edificios ubicados en la zona térmica 6 (regiones de Aysén y Magallanes), de acuerdo a la herramienta de certificación del comportamiento térmico de edificios de Chile (Bustamante et al., 2006).

---

<sup>3</sup> B0/W35: Indica que el COP de calefacción es para una temperatura de entrada y salida de la bomba de calor geotérmica de 0°C y 35°C. Además, indica que el fluido calo-portador o refrigerante circula a través de un circuito cerrado enterrado en el subsuelo.

<sup>4</sup> B20/W9: Indica que el COP de refrigeración es para una temperatura de entrada y salida de la bomba de calor geotérmica de 20°C y 9°C. Además, indica que el fluido calo-portador o refrigerante circula a través de un circuito cerrado enterrado en el subsuelo.



Figura 34. Edificio del Gobierno Regional de Aysén.

La temperatura de diseño de calefacción ( $-3^{\circ}\text{C}$ ) considera cubrir el 100% de la demanda durante el 99% del tiempo que se requiere calefacción. La temperatura de diseño de refrigeración ( $25^{\circ}\text{C}$ ) considera cubrir el 100% de la demanda durante el 99% del tiempo que se requiere refrigeración. Para determinar estas temperaturas se consideró el registro de temperatura cada hora (entre 2013 y 2016) en la estación meteorológica El Claro, ubicada al oeste de la ciudad de Coyhaique (Agromet, 2017). Las características del edificio para determinar las ganancias/perdidas de calor por transmisión y el coeficiente global de transmisión se detallan en la Tabla 6:

Tabla 6. Dimensiones del edificio, parámetros térmicos de la envolvente y temperaturas de diseño.

Dimensiones del edificio		Referencia
Superficie total [ $\text{m}^2$ ]	2600	
Número de pisos	5	
Altura edificio [m]	14 <sup>1</sup>	(RETScreen, 2005)
Superficie en planta [ $\text{m}^2$ ]	520	
Perímetro [m]	91,2	(RETScreen, 2005)
Porcentaje ventanas %	30	Máx. 37% (Bustamante et al., 2006)
Área muros [ $\text{m}^2$ ]	894	
Área ventanas [ $\text{m}^2$ ]	383	
Coeficiente de transmisión envolvente del edificio		
Vidrio reflectante simple [ $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ ]	5,7	ISO 10077-1 y EN 13363-1 (Bustamante et al., 2006)
Techumbre [ $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ ]	0,27	NCh 2251 – Zona térmica 6 (Bustamante et al., 2006)
Muros [ $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ ]	1,1	NCh 2251 - Zona térmica 6 (Bustamante et al., 2006)
Piso transmitancia térmica lineal [ $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ ]	1	NCh853 Zona térmica 6 (Bustamante et al., 2006)
Temperaturas de diseño		
Temp. confort invierno y verano [ $^{\circ}\text{C}$ ]	23	(RETScreen, 2005)
Temp. diseño calefacción [ $^{\circ}\text{C}$ ]	-3	
Temp. diseño refrigeración [ $^{\circ}\text{C}$ ]	25	
<b>Coef. de transferencia global [<math>\text{W}/^{\circ}\text{C}</math>]</b>	<b>3398</b>	

<sup>1</sup> 5 pisos de 3m y el primer piso que se considera 1m enterrado.

Las ganancias solares se calculan considerando una relación lineal entre la ganancia solar mínima del invierno y la ganancia solar máxima del verano. Para el invierno se considera una ganancia solar mínima de  $26\text{W}/\text{m}^2$  asociada a una temperatura de  $1^{\circ}\text{C}$ . Bajo  $1^{\circ}\text{C}$  no se considera ganancia solar. Para el verano se considera una ganancia solar mínima de  $89\text{W}/\text{m}^2$  asociada a una

temperatura de 21°C. Sobre 21°C la ganancia solar es constante de 89W/m<sup>2</sup> (RETSCreen, 2005). Las ganancias internas sensibles son 5W/m<sup>2</sup> por iluminación, 5W/m<sup>2</sup> por equipos y 74,6W/m<sup>2</sup> por persona. Las ganancias de calor latentes son 74,6W/m<sup>2</sup> por persona (RETSCreen, 2005). Las ganancias/perdidas de calor por renovación de aire (latentes y sensibles), se relacionan a la temperatura y humedad del aire. Se considera una renovación de aire de 10 litros por persona cada segundo. Solo se consideran ganancias/perdidas de calor sensible por renovación de aire a temperaturas ≥ 10°C.

A continuación, se muestra la carga térmica asociada a la temperatura exterior, de manera discreta cada 1°C.

Tabla 7. Resumen de cargas térmicas edificio del Gobierno Regional de Aysén.

Temperatura °C	Transmisión Watt	Ganancia solar Watt	Ganancias sensibles Watt	Ganancias latentes Watt	Renov. aire (latente) Watt	Renov aire (sensible) Watt	<b>Total KWatt</b>
-3	-88.362	0	34.504	8.504	-35.745	0,00	<b>-81.1</b>
-2	-84.964	0	34.504	8.504	-34.371	0,00	<b>-76.3</b>
-1	-81.565	0	34.504	8.504	-32.996	0,00	<b>-71.6</b>
0	-78.167	0	34.504	8.504	-31.621	0,00	<b>-66.8</b>
1	-74.768	8.104	34.504	8.504	-30.246	0,00	<b>-53.9</b>
2	-71.369	9.088	34.504	8.504	-28.871	0,00	<b>-48.1</b>
3	-67.971	10.072	34.504	8.504	-27.496	0,00	<b>-42.4</b>
4	-64.572	11.056	34.504	8.504	-26.121	0,00	<b>-36.6</b>
5	-61.174	12.040	34.504	8.504	-24.747	0,00	<b>-30.9</b>
6	-57.775	13.024	34.504	8.504	-23.372	0,00	<b>-25.1</b>
7	-54.377	14.009	34.504	8.504	-21.997	0,00	<b>-19.4</b>
8	-50.978	14.993	34.504	8.504	-20.622	0,00	<b>-13.6</b>
9	-47.579	15.977	34.504	8.504	-19.247	0,00	<b>-7.8</b>
10	-44.181	16.961	34.504	8.504	-17.872	-14.298	<b>-16.4</b>
11	-40.782	17.945	34.504	8.504	-16.498	-13.968	<b>-10.3</b>
12	-37.384	18.929	34.504	8.504	-15.123	-13.510	<b>-4.1</b>
13	-33.985	19.913	34.504	8.504	-13.748	-12.923	<b>2.3</b>
14	-30.587	20.897	34.504	8.504	-12.373	-12.208	<b>8.7</b>
15	-27.188	21.881	34.504	8.504	-10.998	-11.365	<b>15.3</b>
16	-23.789	22.865	34.504	8.504	-9.623	-10.393	<b>22.1</b>
17	-20.391	23.849	34.504	8.504	-8.249	-9.293	<b>28.9</b>
18	-16.992	24.834	34.504	8.504	-6.874	-8.065	<b>35.9</b>
19	-13.594	25.818	34.504	8.504	-5.499	-6.709	<b>43.0</b>
20	-10.195	26.802	34.504	8.504	-4.124	-5.224	<b>50.3</b>
21	-6.797	27.786	34.504	8.504	-2.749	-3.611	<b>57.6</b>
22	-3.398	27.786	34.504	8.504	-1.374	-1.869	<b>64.2</b>
23	0	27.786	34.504	8.504	0	0	<b>70.8</b>
24	3.398	27.786	34.504	8.504	1.374	1.998	<b>77.6</b>
25	6.797	27.786	34.504	8.504	2.749	4.124	<b>84.5</b>



El resultado de carga térmica (Tabla 7) indica una carga de -81,1 kW y 84,5 kW de calefacción y refrigeración, respectivamente para las temperaturas de diseño. Lo anterior, corresponde a una carga térmica 31,2 Watts/m<sup>2</sup> y 32,5 Watts/m<sup>2</sup> para calefacción y refrigeración, respectivamente.

### 5.5 Demanda energética del Gobierno Regional de Aysén

Para determinar la demanda energética se consideran los grados-hora en el horario de funcionamiento del edificio. Esto corresponde al número de horas que se registra un intervalo de temperatura (en este caso intervalos de 1°C). El horario de funcionamiento del edificio se considera entre las 6:00 am y 9:00pm de lunes a sábado. Luego, la demanda energética, se calcula multiplicando la carga energética (KW) asociada a cada intervalo de temperatura por el número de horas del mes que registran esa temperatura (Tabla 8). El signo negativo de la demanda de calefacción indica el flujo de calor va desde el subsuelo hacia el edificio. El detalle de la demanda energética por mes está en la Tabla A-21 de los Anexos.

Tabla 8. Demanda energética de calefacción y refrigeración del edificio del Gobierno Regional Aysén.

Mes	Demanda energética Calefacción [KWh]	Demanda energética Refrigeración [kWh]
Enero	-894	11984
Febrero	-1129	8549
Marzo	-2666	5686
Abril	-5831	1909
Mayo	-9792	51
Junio	-12445	4
Julio	-15758	19
Agosto	-12684	40
Septiembre	-8674	411
Octubre	-5008	2108
Noviembre	-2959	3787
Diciembre	-1511	5799

La demanda energética de calefacción existe todos los meses y alcanza su máximo del año en el mes de julio -15.758kWh. Por otro lado, la demanda energética de refrigeración es significativa durante el verano, llegando hasta 11.984 kWh en el mes de enero. Sin embargo, Durante los meses de invierno la demanda de refrigeración es despreciable (4kWh en junio). La Figura 35 muestra gráficamente la demanda energética para el edificio del Gobierno Regional de Aysén durante 1 año. De acuerdo a los datos de carga térmica y demanda energética, el edificio del Gobierno Regional Aysén utiliza la bomba de calor geotérmica con propósitos de calefacción con un factor de planta de 11% y con propósitos de refrigeración con un factor de planta de 5,5%.

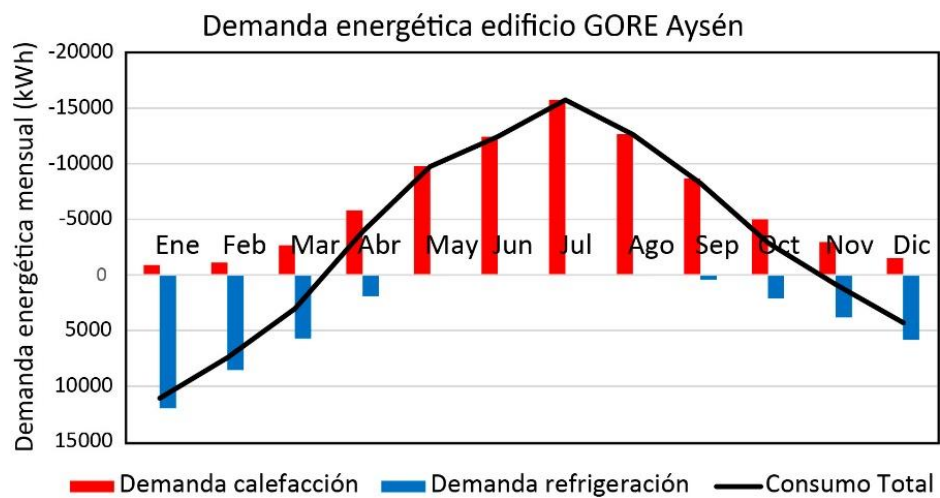


Figura 35. Demanda energética de calefacción y refrigeración del edificio del Gobierno Regional Aysén y balance energético mensual. Barras azules representan refrigeración, barras rojas representan calefacción y la línea negra muestra el balance energético mensual.

## 6. Métodos numéricos

Para realizar el modelo de transferencia de agua subterránea en la cuenca del río Coyhaique, se considera flujo de agua en estado estacionario, en un acuífero no-confinado con superficie freática. Por otro lado, para el caso de los intercambiadores de calor verticales cerrados se considera transferencia de calor cuasi-estacionaria (Eskilson and Claesson, 1988).

### 6.1 Ecuaciones para la transferencia de agua y calor

En área de interés, el agua subterránea que está en el acuífero no-confinado, se mueve esencialmente de manera horizontal. Por lo tanto, el flujo de agua tipo Darcy y el transporte de calor se modelan en la componente horizontal y se promedian verticalmente para aproximar los movimientos verticales. Entonces, se trabaja con ecuaciones 2D, integradas en profundidad (Diersch, 2014). Con lo anterior, el acuífero se considera como una capa de un medio poroso saturado de espesor  $B$  [m], que depende de la ubicación en planta y el tiempo *i.e.*,  $B = B(x_1; x_2; t)$ . La parte inferior de esta capa se considera estacionaria y la parte superior se considera limitada por una superficie freática en movimiento.

Para el acuífero no-confinado:

$$B(x_1, x_2, t) = h(x_1, x_2, t) - f^B(x_1, x_2) \quad 30$$

Donde,  $h = h(x_1, x_2, t)$  es la carga hidráulica [m] en 2D (horizontal) en función del tiempo y la función  $f^B(x_1, x_2)$  es la parte inferior de la zona completamente saturada [m] (Figura 36).

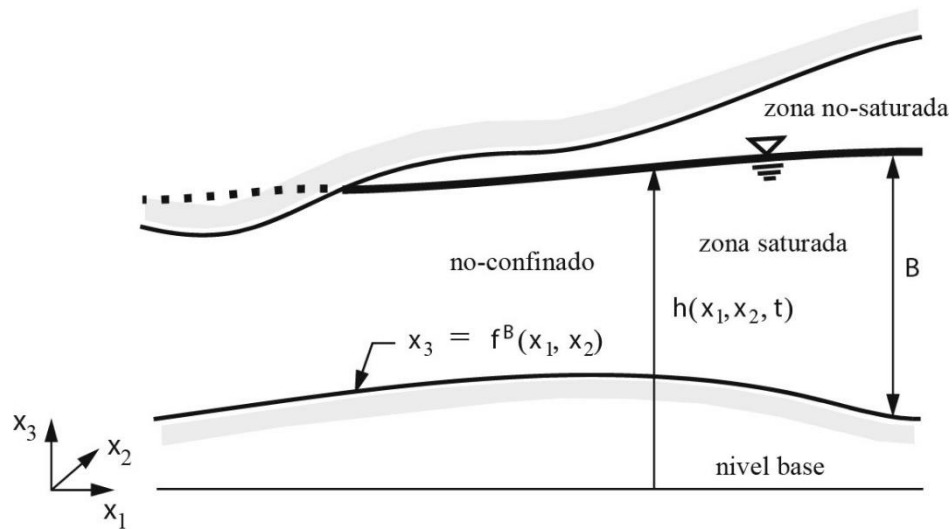


Figura 36. Perfil vertical de un acuífero que indica condiciones no-confinadas para un acuífero (Modificado de Diersch, 2014).

Las ecuaciones de balance para el flujo agua subterránea y el transporte de calor, promediadas verticalmente, en un acuífero no-confinado, se resumen a continuación:

### Balance de masa del fluido:

$$(\bar{S}_0 + \varepsilon_e) \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{q} = \bar{Q} \quad 31$$

Donde,  $\bar{S}_0$  es el coeficiente de almacenamiento específico [1],  $\varepsilon_e$  es la porosidad efectiva [1],  $\partial h/\partial t$  es la variación de carga hidráulica en función del tiempo,  $\bar{q}$  es la velocidad de Darcy integrada en profundidad [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ] y  $\bar{Q} = B_\varepsilon Q + \mathbf{P}$  representa las fuentes/sumideros de flujo de agua integrados en profundidad [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ], con  $B_\varepsilon$  porosidad del medio saturado,  $Q$  fuentes/sumideros de agua y  $\mathbf{P}$  acreción en la superficie freática (*e.g.* recarga de lluvia).

En este trabajo el flujo de agua subterránea se considera estacionario *i.e.*,  $\partial h/\partial t = 0$ . Esta clase de modelamiento es adecuado para este trabajo, si se asume que la variación de pequeña escala temporal en el flujo de agua subterránea es despreciable respecto de la variación temporal del transporte de calor alrededor de los intercambiadores verticales cerrados.

### Balance de Momentum:

$$\bar{q} = -\mathbf{BK}f_u \cdot \nabla h \quad 32$$

Donde,  $\mathbf{B}$  espesor del acuífero [m],  $\mathbf{K}$  es el tensor de conductividad hidráulica [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $f_u$  relación de viscosidad dinámica [1] y  $\nabla h$  gradiente de carga hidráulica.

### Balance de energía

$$\frac{\partial}{\partial t} [\mathbf{B}(\varepsilon\rho c + (1 - \varepsilon)\rho^s c^s)(T - T_0)] + \nabla \cdot (\rho c \bar{q}(T - T_0)) - \nabla \cdot (\bar{\mathbf{A}} \cdot \nabla T) = \bar{\mathbf{H}}_e \quad 33$$

Donde,  $\varepsilon$  es la porosidad [1],  $\rho$  es la densidad del líquido [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $c$  es la capacidad calorífica del líquido [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ ],  $\rho^s$  es la densidad de la fase sólida [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $c^s$  es la capacidad calorífica específica de la fase sólida [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ ],  $T$  es la temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $T_0$  es la temperatura de referencia [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $\bar{\mathbf{A}}$  es el tensor de dispersión hidrodinámica integrado en profundidad [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{C}^{-1}$ ] y  $\bar{\mathbf{H}}_e = \mathbf{BH}_e$  representa las fuentes/sumideros de energía interna  $H_e$  integradas en profundidad [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$ ].

Las relaciones constitutivas de las ecuaciones de balance son las siguientes:

$$\mathbf{B} = h - f^B \quad 34$$

Donde,  $h$  es la carga hidráulica y  $f^B$  es el límite inferior del acuífero.

$$\bar{S}_0 = \rho_0 g \mathbf{B}(\varepsilon\gamma + v) \quad 35$$

Donde,  $\rho_0 g B(\varepsilon \gamma + \nu)$  es el coeficiente de almacenamiento específico, con  $\rho_0$  densidad de referencia [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $g$  vector de gravedad [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ],  $B$  espesor del acuífero [m],  $\varepsilon$  es la porosidad [1],  $\gamma$  es la compresibilidad [ $\text{kg}^{-1} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$ ] y  $\nu$  es la razón de *Poisson* [1].

$$f_\mu = \frac{\mu_0}{\mu(T)} \quad 36$$

Donde,  $f_\mu$  es una relación de la viscosidad dinámica [1], que depende de la viscosidad dinámica de referencia  $\mu_0$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ] y su variación con la temperatura  $\mu(T)$ .

$$\bar{A} = B[\varepsilon \Lambda + (1 - \varepsilon) \Lambda^s] \delta + \rho c \bar{D}_{mech} \quad 37$$

Donde,  $\bar{A}$  es tensor de dispersión hidrodinámica integrado en profundidad [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{C}^{-1}$ ], con  $\Lambda$  coeficiente de conductividad térmica del líquido [ $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{C}^{-1}$ ],  $\Lambda^s$  coeficiente de conductividad térmica del sólido [ $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{C}^{-1}$ ],  $\delta$  es la matriz identidad,  $\rho$  es la densidad del líquido [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $c$  es la capacidad calórica del líquido [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ ] y  $\bar{D}_{mech}$  es el tensor de dispersión mecánica integrada en profundidad [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ].

## 6.2 Condiciones de borde para el flujo de agua

En los bordes  $\Gamma$  del dominio  $\Omega$  del modelo, se incluyen condiciones de borde. En este caso las condiciones de borde son Tipo-Dirichlet (1<sup>er</sup> orden), representan condiciones esenciales en el modelo y Tipo-Cauchy (Robin) (3<sup>er</sup> orden), las cuales representan formulaciones estándar para el flujo de agua subterránea.

### **Carga hidráulica constante: condición de borde Tipo-Dirichlet (1<sup>er</sup> orden)**

La condición de borde de carga hidráulica constante se ocupa cuando se conoce la carga hidráulica  $h$  en un borde  $\Gamma$  del dominio del modelo  $\Omega$ . En el caso de la cuenca del río Coyhaique, se ocupa en el borde oeste del modelo (río Simpson Figura 42).

$$h(x, t) = h_D \quad 38$$

Donde,  $h_D$  representa valores de carga hidráulica en un borde  $\Gamma_1 \subset \Gamma$ .

### **Transferencia de fluido: condición de borde Tipo-Cauchy (3<sup>er</sup> orden)**

La condición de borde de transferencia de fluido se basa en la relación que existe entre una carga hidráulica de referencia y la carga hidráulica calculada el modelo en el mismo lugar. Esta es una condición de borde para determinar la interacción que existe entre ríos y acuíferos. En el caso de la cuenca del río Coyhaique, se ocupa para el río Coyhaique y los esteros asociados (Figura 42).

Para un acuífero no-confinado:

$$q_{nh}(x, t) = -[k_r K f_u \cdot (\nabla h + X e)] \cdot n = -\phi_n (h_c - h) \quad 39$$

En el borde  $\Gamma_3$  del modelo para  $t[t_0, \infty)$ .

Donde,  $h_c$  es la carga hidráulica de referencia en el borde  $\Gamma_3 \subset \Gamma$  y  $h$  es la carga hidráulica calculada. Además,  $k_r$  es la permeabilidad relativa,  $\mathbf{K}$  es el tensor de conductividad hidráulica,  $f_\mu$  es una función de la viscosidad y  $\mathcal{X}e$  es el coeficiente de flotabilidad en la dirección de la aceleración de gravedad. El signo de  $q_{nh} = q \cdot n$ , es positivo si el flujo es hacia afuera del acuífero  $h > h_c$ . El coeficiente de transferencia  $\phi_h$  tiene dirección dual:

$$\phi_h = \begin{cases} \phi_h^{in}(x, t) \\ \phi_h^{out}(x, t) \end{cases} \quad 40$$

Considerando las 2 alternativas para el coeficiente de transferencia, se puede distinguir entre condiciones de infiltración ( $q_{nh} < 0$  e.g., infiltración desde la superficie al acuífero) y condiciones de emisión ( $q_{nh} > 0$  e.g., emisión desde el acuífero hacia la superficie).

El coeficiente de transmisión  $\phi_h$ , es un coeficiente de resistencia al flujo de agua a través de una superficie (para el caso 3D). Además, considera condiciones diferentes para la infiltración hacia el acuífero y emisión desde el acuífero, mediante los coeficientes  $\phi_h^{in}$  y  $\phi_h^{out}$ , respectivamente. Finalmente, si  $\phi_h \equiv 0$ , la superficie se impermeable.

Los problemas de transferencia de fluido se pueden asociar a diferentes tipos de colmatación de ríos sobre la superficie, respecto del acuífero. Para el caso de infiltración ( $\phi_h \rightarrow \phi_h^{in}$  i.e.,  $h_c > h$ ), un río que se encuentra colmatado por una capa de espesor  $d$  y conductividad hidráulica  $k_o^{in}$ . Usualmente, la conductividad hidráulica de  $k_o^{in}$  es menor que la conductividad hidráulica del acuífero modelado  $k_1$ . De esta manera el dominio del modelo  $\Omega$  termina en el límite interno de la capa colmatada  $\Gamma_3$  (Figura 37).

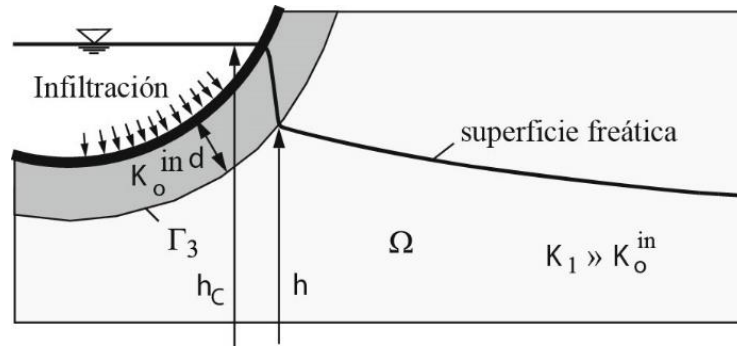


Figura 37. Coeficiente de transferencia  $\phi_h = \phi_h^{in}$ , para el cual el estado de colmatación de un río genera infiltración hacia el acuífero (Modificado de Diersch, 2014).

El flujo a través de la capa colmatada se puede determinar a partir de la ecuación de Darcy:

$$q_{nh} \approx -\mathbf{K}_0^{in} \frac{\Delta h}{\Delta s} = -\mathbf{K}_0^{in} \frac{h_c}{d} \quad 41$$

Donde  $s$  y  $\Delta s$  representan el largo del arco y la distancia en la dirección del flujo, respectivamente. Haciendo, la ecuación 39 igual a la ecuación 41, resulta una expresión para el coeficiente de transferencia  $\phi_h^{in}$  en 3D:

$$\phi_h^{in} = \frac{K_o^{in}}{d} \quad 42$$

Para la emisión de flujo, desde el acuífero al río (Figura 38), la expresión para el coeficiente de transferencia  $\phi_h^{out}$  en 3D se obtiene de manera análoga:

$$\phi_h^{out} = \frac{K_o^{out}}{d} \quad 43$$

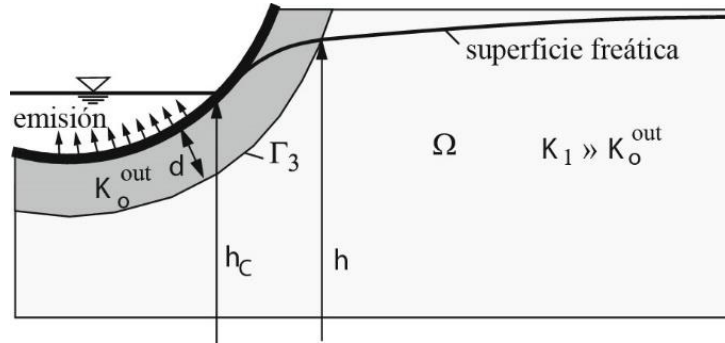


Figura 38. Coeficiente de transferencia  $\phi_h = \phi_h^{out}$ , para el cual el estado de colmatación de un río genera flujo de agua del acuífero al río (Modificado de Diersch, 2014).

Los coeficientes de infiltración  $\phi_h^{in}$  y  $\phi_h^{out}$  son diferentes, si  $K_o^{in} \neq K_o^{out}$ .

#### 6.4 Transferencia de calor: intercambiadores de calor verticales cerrados

En este trabajo se considera intercambiadores de calor verticales cerrados dobles (tipo 2U). Cada intercambiador de calor vertical cerrado, consiste en 2 cañerías en forma de U, a través de las cuales circula un fluido calo-portador (usualmente agua con anticongelante) en un circuito cerrado. Estas cañerías insertas verticalmente en los pozos, están fijadas por un mortero específico<sup>5</sup>. Los intercambiadores de calor transfieren calor de manera conductiva/convectiva al medio que los rodea dependiendo de la circulación de agua subterránea (Self et al., 2013).

El arreglo de intercambiadores de calor, se modela con elementos finitos de acuerdo a las ecuaciones descritas en (Diersch et al., 2011a). Cada intercambiador de calor se representa como una serie de nodos 1D, que se acoplan al medio que los rodea 3D como una condición de borde interna del modelo.

Para realizar el modelamiento de la transferencia de calor de intercambiadores de calor, se utiliza el método cuasi-estacionario de Eskilson & Claesson (1988). Este método, calcula una temperatura del borde externo de cada nodo del intercambiador de calor, en función de la velocidad del fluido refrigerante y sus temperaturas de entrada y salida del intercambiador de calor y

<sup>5</sup> Mortero específico de intercambiador de calor: El mortero es un compuesto de conglomerantes inorgánicos (usualmente cemento), agregados finos, agua. Para el caso de los intercambiadores de calor, el mortero que rellena el espacio entre las cañerías en forma de U y el pozo debe ser especial: más fluido que lo común y con propiedades térmicas que favorezcan el intercambio de calor en el largo plazo.

asumiendo equilibrio dinámico entre sus componentes. Luego la temperatura del borde del intercambiador de calor se ocupa como condición de borde interna del modelo. Esta solución, se ocupa para las simulaciones de largo plazo (Diersch et al., 2011a).

### Tipo de intercambiador de calor vertical cerrado: 2U

En este trabajo se consideran intercambiadores de calor del tipo doble U o 2U, el cual consiste en 2 cañerías en forma de U al interior de un pozo relleno con un mortero específico para la construcción de intercambiadores de calor. La Figura 39 muestra el esquema básico de un intercambiador de calor 2U y las temperaturas involucradas: 2 cañerías introducen el fluido calorportador al intercambiador de calor con temperatura ( $T_{i1}, T_{i2}$ ), 2 cañerías sacan el fluido calorportador del intercambiador de calor con temperatura ( $T_{o1}, T_{o2}$ ), el mortero ( $T_g$ ) y el subsuelo que rodea al intercambiador de calor ( $T_s$ ). Con esta configuración  $T_{i1} = T_{i2}$  y  $T_{o1} = T_{o2}$ .

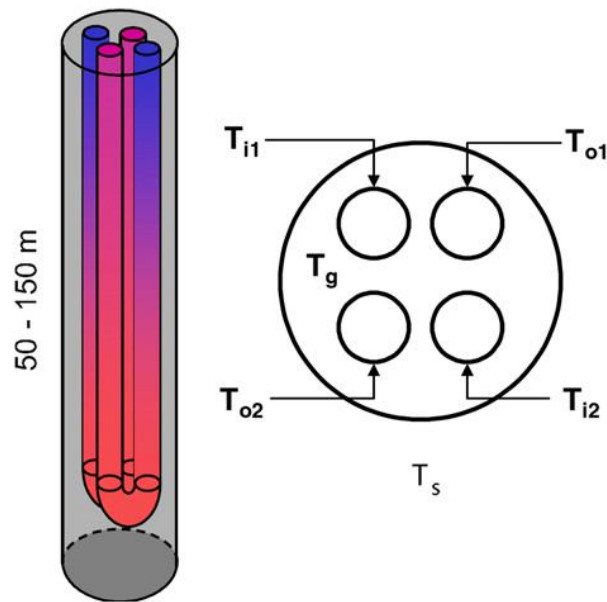


Figura 39. Esquema de intercambiador de calor vertical cerrado tipo doble U o 2U (Al-Khoury & Bonnier 2006).

Para mejorar la aproximación de la transferencia de calor entre el mortero y las cañerías, se utiliza el modelo de resistencia y capacidad térmica de Bauer et al. (2011), que correlaciona las diversas partes del mortero asociadas las cañerías del intercambiador de calor en una sección transversal. El mortero se considera como un material homogéneo. El modelo de resistencia y capacidad térmica, divide la sección transversal del intercambiador de calor 2U en 8 componentes:

- 2 cañerías que ingresan el refrigerante al intercambiador de calor (indicadas como  $i1$  e  $i2$ ).
- 2 cañerías que sacan el refrigerante del intercambiador de calor (indicadas como  $o1$  e  $o2$ ).
- 4 zonas del mortero (indicadas como  $g1$ ,  $g2$ ,  $g3$  y  $g4$ ).

Las cañerías ( $i1, i2, o1$  y  $o2$ ) intercambian calor de manera directa con las zonas del mortero ( $g1, g2, g3$  y  $g4$ ). Solo las zonas del mortero, intercambian calor con el suelo, porque no hay contacto directo entre las cañerías y el suelo. Las relaciones de temperatura y dimensiones del intercambiador de calor 2U, en una sección transversal, se muestran en la Figura 40.



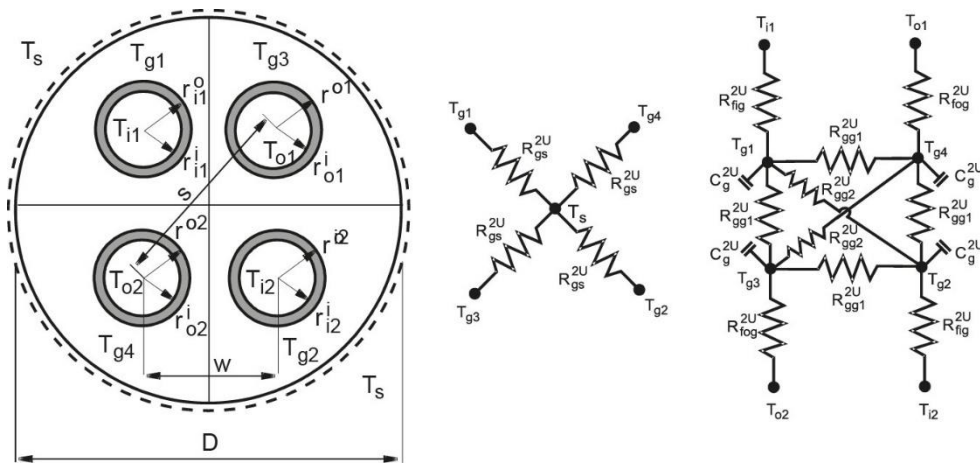


Figura 40. Relación de resistencias térmicas entre las cañerías del intercambiador de calor 2U y los 4 componentes del mortero. A la izquierda: la relación espacial y de tamaño entre los componentes del intercambiador de calor, además de los valores de temperatura y resistencia térmica. En el centro: la relación entre las temperaturas del mortero y el suelo. A la derecha: la relación entre las temperaturas de las cañerías y las partes del mortero (Diersch et al. 2011a).

### Solución analítica de la temperatura de borde del intercambiador de calor

La solución analítica del problema se resuelve mediante el método de Eskilson & Claesson (1988), el cual se aplica al intercambiador de calor 2U con el modelo de resistencia y capacidad térmica de Bauer et al. (2011). El método entrega relaciones explícitas para las temperaturas de las tuberías y el mortero dependiendo de la posición vertical y el tiempo. Estos resultados se acoplan a la temperatura del suelo, mediante la transferencia de calor entre intercambiador de calor 2U y el medio que lo rodea (subsuelo).

Esta solución es válida solo para un estado cuasi-estacionario de transporte de calor a una temperatura  $T_s = T_s(z, t)$ , en la pared del intercambiador de calor. El equilibrio local, limita la aplicación del método a una escala de tiempo (Eskilson and Claesson, 1988) y, por lo tanto, no es válida para Test de Respuesta Térmica (TRT) o simulaciones que consideran una escala de tiempo de horas (Diersch et al., 2011a). Sin embargo, es válida para escalas de tiempo que consideran días o meses en una situación estacionaria (FEFLOW-training-manual, 2016).

La solución para la temperatura en la sección transversal del intercambiador de calor 2U, depende de los coeficientes de transferencia de calor de los componentes del intercambiador de calor, los cuales a la vez dependen de las resistencias térmicas y geometría de los materiales, la velocidad de refrigerante y su temperatura de entrada y salida del intercambiador de calor 2U (Diersch et al., 2011a).

### Condiciones de borde

#### Temperatura: condición de borde Tipo-Dirichlet (1<sup>er</sup> orden)

Para el caso de interés en este trabajo, en el borde superior del dominio, la temperatura se asume constante durante todo el tiempo que dura el modelamiento de transferencia de calor.

$$T_s(x, t) = T_s^R(t) \quad \text{en } \Gamma_1 \times t[0, \infty) \quad 44$$

Donde,  $T_s$  es la temperatura del suelo y  $T_s^R$  es la temperatura del suelo en el borde  $\Gamma_1$ .

### Temperatura y flujo de calor: condición de borde Tipo Cauchy (3<sup>er</sup> orden)

Debido a que el modelo de transferencia de calor, entre los intercambiadores de calor verticales cerrados y el subsuelo, considera que la energía se transmite de manera constante a lo largo de cada mes, se ocupa el método cuasi estacionario para su modelamiento (Eskilson and Claesson, 1988). Este método ocupa la temperatura del mortero  $T_{gi}$  y el suelo  $T_s$  para determinar el flujo de calor  $q_{nT_s}$  en cada nodo que conecta el intercambiador de calor al suelo  $\Gamma_3$  (Diersch et al., 2011a):

$$q_{nT_s}(x, t) = -\sum_{i=1}^G \phi_{sg}(T_{gi} - T_s) \quad \text{en } \Gamma_3 \times t[0, \infty) \quad 45$$

Donde,  $\phi_{sg} = \phi_{gs}$  es el coeficiente de transferencia de calor entre el suelo y el mortero,  $G$  indica el número de zonas del mortero que en este caso son 4 (Figura 40).

### 6.5 Implementación del intercambiador de calor vertical cerrado

El medio que rodea al intercambiador de calor, es un medio poroso discretizado en elementos prismáticos en 3D, donde el intercambiador de calor 2U se modela en la componente vertical. Cada intercambiador de calor es discretizado en un número  $K$  de nodos; los cuales están conectados a los elementos del medio poroso en 1D (Figura 41). El nodo  $K$  representa una condición de borde interna para los nodos de suelo  $s$ .

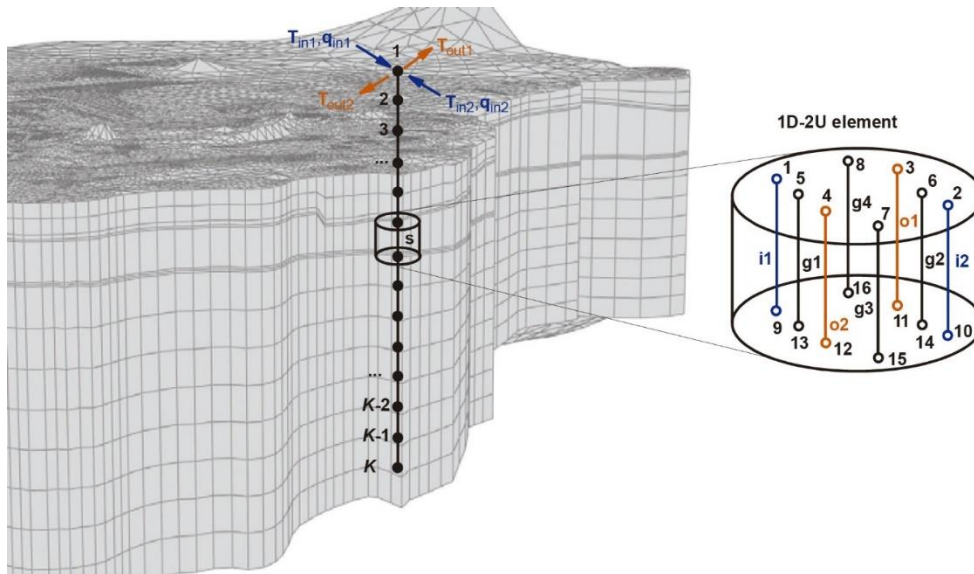


Figura 41. Intercambiador de calor 2U discretizado (Diersch et al. 2011a).

## 7 Transferencia de agua subterránea

En la ciudad de Coyhaique la información de la circulación de agua subterránea es escasa, por lo tanto, para determinar las características del flujo de agua subterránea bajo el edificio del Gobierno Regional de Aysén, se construye un modelo de transferencia de agua subterránea a la escala de la cuenca del río Coyhaique con los datos disponibles. Este modelo se calibra con puntos de observación de cota hidráulica, la cual se determina restando el nivel estático medido (pozos)/estimado (TEM) a la altitud.

### 7.1 Modelo conceptual para la transferencia de agua subterránea

#### Geometría

El modelo conceptual corresponde a la transferencia de agua subterránea en la cuenca del río Coyhaique (Figura 42). Los bordes del dominio corresponden a los límites naturales de la cuenca *i.e.*, en el borde norte, este y sur el borde es la línea divisoria de aguas, mientras que en el borde oeste el río Simpson que marca el límite. El modelo está compuesto por 2 capas que se extienden en todo el dominio: (i) una capa superior de 60-80m de espesor, compuesta por sedimentos de origen glacial semipermeables y (ii) una capa inferior de 100m de espesor, compuesta por lutitas impermeables de la Formación Katterfeld. Ambas capas del modelo tienen espesores típicos observados en la ciudad de Coyhaique.

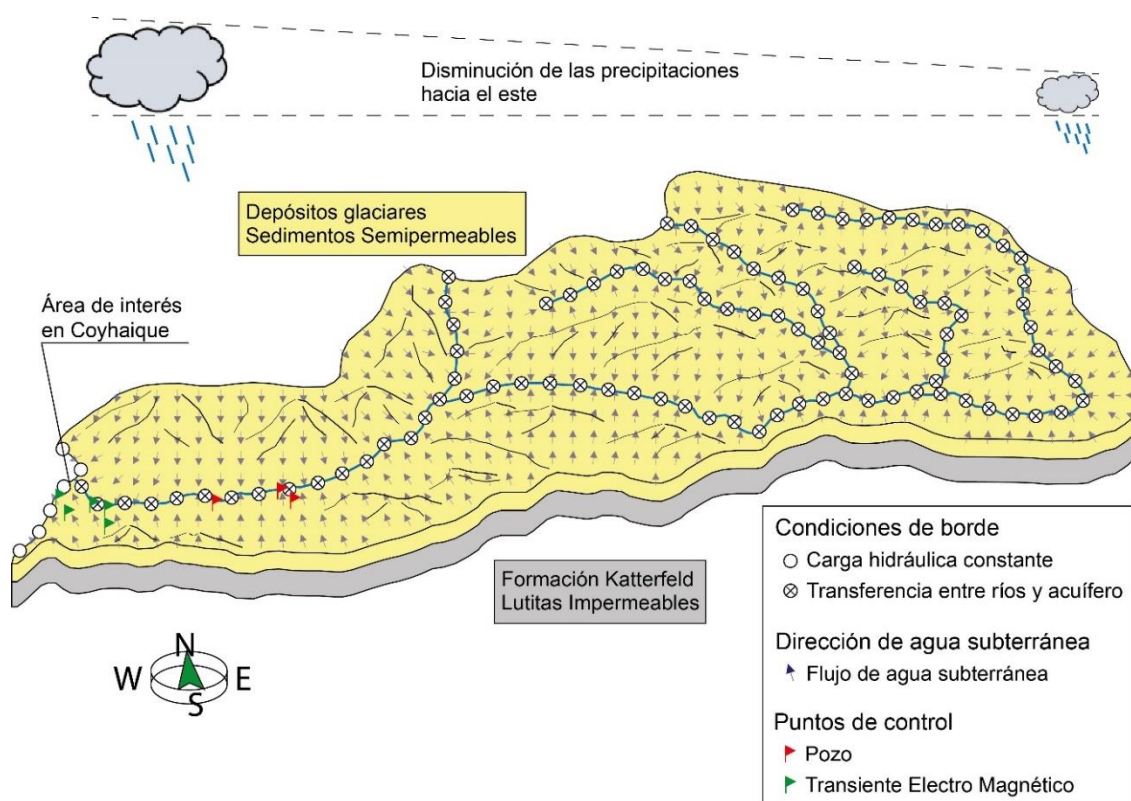


Figura 42. Modelo conceptual para la transferencia de agua subterránea en la Cuenca del río Coyhaique.

## **Condiciones de borde**

En el borde oeste del modelo (río Simpson) la carga hidráulica del agua subterránea se iguala con la altura del río, por lo tanto, la condición de borde es de carga hidráulica constante (Figura 42). Por otro lado, el río Coyhaique y sus tributarios se consideran como límite que conecta la escorrentía de agua superficial y el acuífero a través de una condición de borde de transferencia. Esta condición de borde, traspasa agua del río al acuífero, cuando la altura de la superficie freática del acuífero es menor que la altura del río y traspasa agua del acuífero al río cuando la altura de la superficie freática del acuífero es mayor que la altura del río (Figura 42).

## **Fuentes/sumideros de agua**

Se considera la infiltración de precipitación pluvial como la fuente exclusiva de recarga del acuífero en todo el dominio del modelo. Considerando que la precipitación disminuye hacia el este, la recarga del modelo también es decreciente hacia el este. El agua subterránea se mueve por efecto de la gravedad, desde las zonas altas hacia el río y tributarios del río Coyhaique y luego hacia el área topográficamente más baja del modelo (río Simpson) y, por lo tanto, se considera como el límite a través del cual se evacua el agua subterránea de la cuenca (Figura 42).

## **Tipo de modelo y puntos de observación para calibrar**

El modelo de transferencia de agua subterránea es estacionario, por lo que no tiene condiciones iniciales. Al oeste del modelo, se encuentran puntos de observación de cota hidráulica (Figura 42), los cuales sirven para calibrar el modelo.

## **7.2 Geometría del dominio y enmallado para la transferencia de agua subterránea**

El modelo se está compuesto por 2 unidades sub-horizontales. La unidad superior corresponde al relleno sedimentario que tiene una potencia variable que puede llegar a 80m de acuerdo a la interpretación de los perfiles verticales de resistividad eléctrica (Figura 15, Figura 16, Figura 17, Figura 18 y Figura 19) y que se reduce en las cercanías del río Coyhaique y sus tributarios por efecto de la erosión fluvial sobre la cobertura de sedimentos (Arqueros, 2004). Bajo el relleno sedimentario se considera una capa de roca que en la ciudad de Coyhaique corresponde a lutitas de la Formación Katterfeld, las cuales tienen una potencia de al menos 100m (Figura 11). Considerando que las propiedades hidráulicas de las lutitas de Katterfeld, son similares al resto de las rocas que constituyen el basamento rocoso de la cuenca (Tabla 4), se considera que las lutitas de la Fm. Katterfeld se extienden como la unidad inferior en todo el dominio del modelo.

El enmallado es triangular para todo el dominio del modelo. En el área más cercana al río Coyhaique y sus tributarios (~300m del río y sus tributarios), se consideró un enmallado 10 veces más fino, respecto del resto del dominio con una gradación tamaño-decreciente lineal de los elementos hacia los ríos y tributarios. En la unidad que corresponde al relleno sedimentario existen capas cada 10m de profundidad y en la unidad que corresponde a las lutitas de la Formación Katterfeld, existen capas cada 10m solo la parte superior. Con lo anterior, el dominio está discretizado en 15 capas, de las cuales, las 8 capas superiores representan al relleno sedimentario y las 7 inferiores a las lutitas de la Fm. Katterfeld. El dominio del modelo está compuesto por 2.715.062 elementos y 1.457.550 nodos.

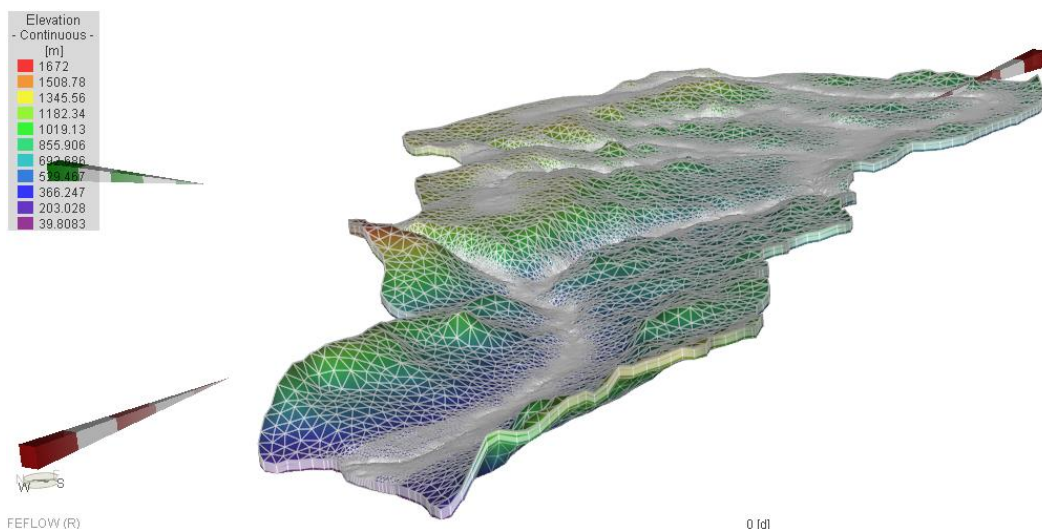


Figura 43. Geometría y enmallado del dominio del modelo para la transferencia de agua subterránea. Exageración vertical 2x.

Como se verá más adelante, el área donde se realiza el modelo de transferencia de calor, tiene condiciones particulares de enmallado, para modelar de manera proporcionada las variaciones de temperatura alrededor de los intercambiadores de calor verticales cerrados.

### 7.3 Configuración del problema para la transferencia de agua subterránea

El modelo para la transferencia de agua subterránea en la cuenca de Coyhaique es considerando el flujo de agua tipo Darcy con una superficie freática para el acuífero no-confinado. La clase del problema es en equilibrio dinámico o estacionario, por lo tanto, no tiene condiciones iniciales.

En modelos no-confinados con superficie freática, la conductividad hidráulica de los elementos parcialmente secos se reduce multiplicando la conductividad saturada por la saturación del elemento. La reducción lineal de conductividad para elementos parcialmente saturados o secos puede conducir a contrastes abruptos en la conductividad hidráulica entre capas parcialmente saturadas o secas, respecto de las capas saturadas. Esto complica la solución numérica, haciéndola inestable. Justamente para evitar este problema existe la saturación residual, que es la mínima carga hidráulica en elementos secos o parcialmente saturados. En este problema la saturación residual es 5m para generar soluciones estables y evitar así el problema de contraste abrupto de conductividad hidráulica.

### 7.4 Propiedades del modelo para la transferencia de agua subterránea

El valor de conductividad hidráulica se asume homogéneo en todas las direcciones. Para la unidad inferior del modelo, compuesta por las lutitas de la Fm. Katterfeld, la conductividad hidráulica medida está entre  $1,2 \cdot 10^{-6}$  y  $2,6 \cdot 10^{-8}$  [m/s] (Tabla 4). Por otro lado, la unidad superior del modelo, compuesta principalmente por sedimentos depositados durante el retroceso de glaciares *e.g.*, till glacial, limo y arena limosa (Arqueros, 2004), se espera un valor de conductividad hidráulica entre  $1 \cdot 10^{-5}$  y  $1 \cdot 10^{-9}$  [m/s] (Fitts, 2013b). La Tabla 9 resume el rango de conductividades hidráulicas consideradas para calibrar el modelo de flujo de agua subterránea.

La porosidad fue determinada de acuerdo al tipo de roca y sedimento, para la unidad inferior y superior, respectivamente. Para la unidad inferior, compuesta por las lutitas de Katterfeld la porosidad está entre 0-10% (Fitts, 2013a). Para la unidad superior, compuesta principalmente por sedimentos glaciares la porosidad esta entre 20-35% (Fitts, 2013a). La Tabla 9 resume el rango de porosidades consideradas para calibrar el modelo de flujo de agua subterránea.

Las variaciones en la compresibilidad son prácticamente despreciables, respecto de la conductividad hidráulica y la porosidad, por lo tanto, se conservó el valor que el FEFLOW tiene por defecto  $10^{-4}$  [1/m].

Los coeficientes de transferencia  $\phi_h^{in}$  y  $\phi_h^{out}$ , para calcular el flujo desde el río hacia el acuífero y desde el acuífero hacia el río, respectivamente tienen valores elevados para que los ríos y esteros respondan de manera inmediata a las variaciones de la cota hidráulica del acuífero (FEFLOW-training-manual, 2016). Los coeficientes de transferencia  $\phi_h^{in}$  y  $\phi_h^{out}$  son  $3,5 \cdot 10^{-4}$  [1/s] y  $4,6 \cdot 10^{-4}$  [1/s].

Tabla 9. Rango de parámetros hídricos para la calibración del modelo de transferencia de agua subterránea.

Parámetro	Lutitas Fm. Katterfeld	Relleno sedimentario glacial
Conductividad hidráulica (x,y,z) [m/s]	$1,2 \cdot 10^{-6}$ - $2,6 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-5}$ y $1 \cdot 10^{-9}$
Porosidad [%]	0-10	20-35
Coefficiente de transferencia $\phi_h^{in}$ [1/s]	-	$3,5 \cdot 10^{-4}$
Coefficiente de transferencia $\phi_h^{out}$ [1/s]	-	$4,6 \cdot 10^{-4}$

La infiltración se considera linealmente decreciente hacia el este (desde 50 a 14 mm/a Figura 44), porque el registro de precipitación pluvial muestra una clara disminución de precipitaciones hacia el este (Figura 8). Por otro lado, la capacidad de infiltración de los sedimentos de origen glacial es reducida, porque su permeabilidad es baja. Entonces, en la cuenca del río Coyhaique se espera una infiltración máxima en el rango de  $\sim 70$  mm/a (Cuthbert et al., 2010).

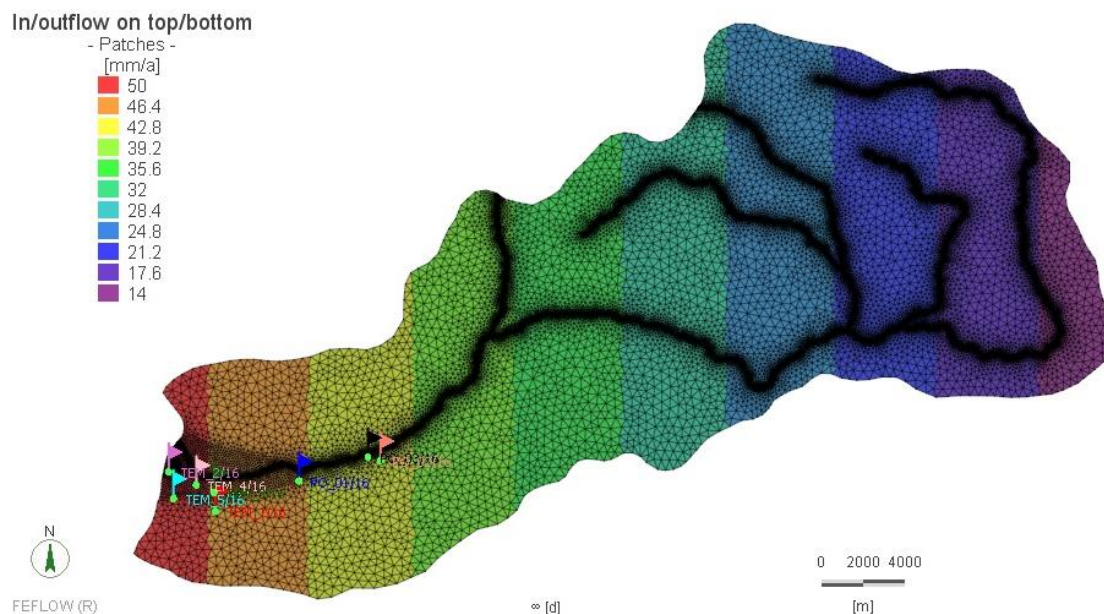


Figura 44. Recarga de agua lluvia en el modelo para la transferencia de agua subterránea.

## 7.5 Parámetros para calibrar el modelo

Para calibrar el modelo, los parámetros se ajustan dentro de rangos bien establecidos. Estos rangos, se construyen de acuerdo a las mediciones de propiedades o estimaciones que dependen del tipo de material (Tabla 9). La carga hidráulica computada coincide con el valor medido/estimado en los puntos de observación cuando los parámetros ajustables del modelo coinciden con los rangos esperados.

### Conductividad hidráulica

Los valores de conductividad hidráulica que calibran el modelo son  $5 \cdot 10^{-8}$  [m/s] para las lutitas de la Fm. Katterfeld que constituyen la unidad inferior y  $1 \cdot 10^{-6}$  [m/s] para el relleno sedimentario de origen glacial que constituye la unidad superior. Esto coincide con los valores esperados (Tabla 9). Adicionalmente, existe un segmento cercano al río Coyhaique, al este de la ciudad de Coyhaique, donde la conductividad hidráulica es mayor respecto del relleno sedimentario de origen glacial, porque existe un volumen importante de relleno fluvial constituido por arena y gravas. Lo anterior, se observa en la geología (Figura 2) y en la estratigrafía del pozo Relleno Sanitario (Figura 11). La Figura 45, muestra la conductividad hidráulica en las cercanías de la ciudad de Coyhaique, al oeste del dominio del modelo.

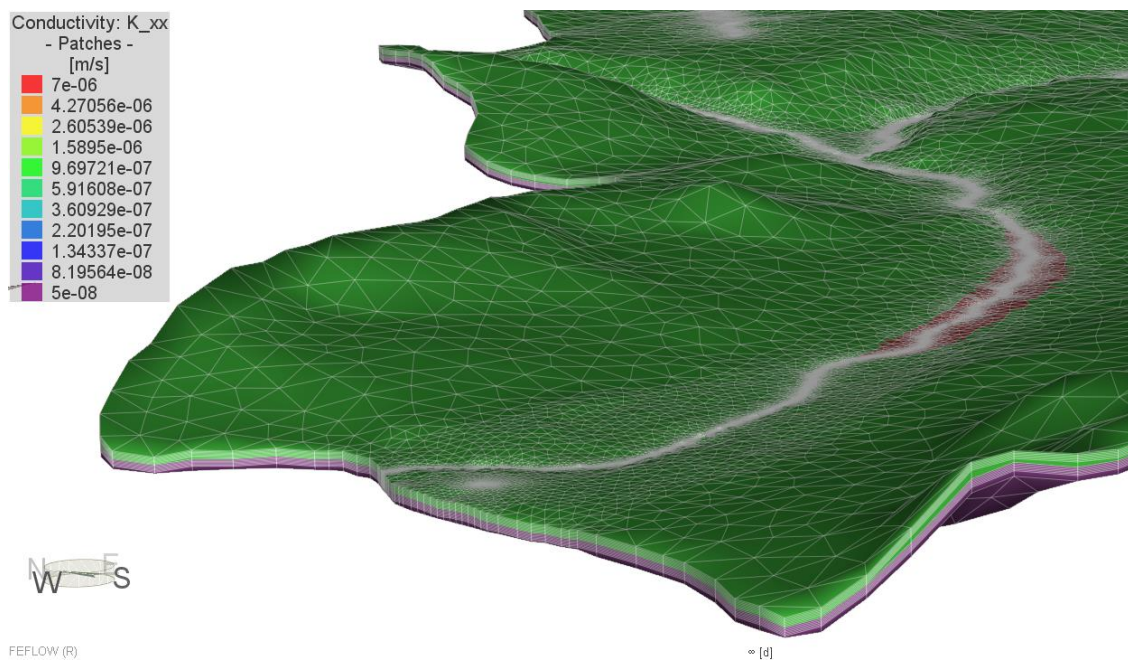


Figura 45. Conductividad hidráulica en la dirección x en la cercanía de la ciudad de Coyhaique.

### Porosidad

Los valores de porosidad adecuados para calibrar el modelo son 5% para las lutitas de la Fm. Katterfeld que constituye la unidad inferior y 30% para el relleno sedimentario de origen glacial que constituye la unidad superior. Esto coincide con los valores esperados (Tabla 9).

## Los coeficientes de transferencia $\phi_h^{in}$ y $\phi_h^{out}$

Los coeficientes de transferencia  $\phi_h^{in}$  y  $\phi_h^{out}$  son una condición de borde en la parte superior del modelo, específicamente en el área donde circula el río Coyhaique y sus afluentes. La Figura 46, muestra a modo de ejemplo el  $\phi_h^{in}$  en la cercanía de la ciudad de Coyhaique. Estos valores son elevados, para que los ríos y esteros respondan de manera inmediata a las variaciones de la cota hidráulica del acuífero.

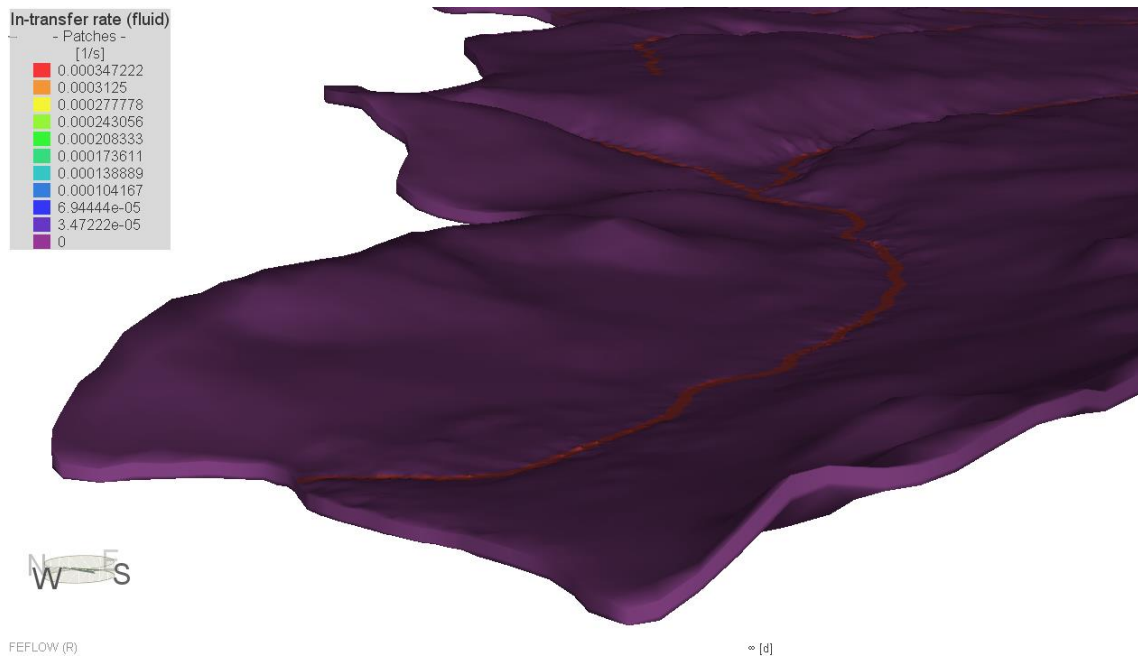


Figura 46. Coeficiente de transferencia  $\phi_h^{in}$  en las cercanías de la ciudad de Coyhaique.

## 7.6 Resultados circulación de agua subterránea en la cuenca del río Coyhaique

A continuación, se describen los principales resultados para el flujo de agua subterránea en la cuenca del río Coyhaique:

### Carga hidráulica

Para la cuenca del río Coyhaique, la carga hidráulica está fuertemente controlada por la topografía. El agua subterránea, se mueve perpendicular a las curvas de igual carga hidráulica, desde la parte alta del modelo hacia el río Coyhaique y sus afluentes (Figura 47). En el sector oeste del modelo existe una componente importante componente del flujo de agua subterránea hacia el oeste, controlada por la carga hidráulica constante en el río Simpson.



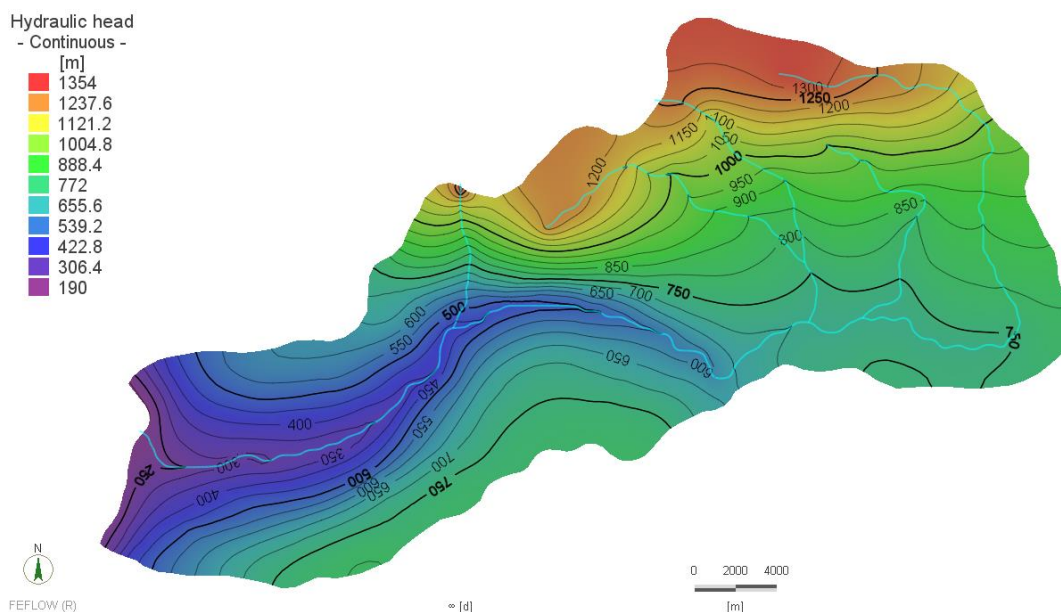


Figura 47. Resultado de carga hidráulica para el flujo de agua subterránea en la Cuenca de Coyhaique.

### Presión en la superficie del modelo

La presión en la parte superior del modelo indica que existe agua en la superficie (presión positiva) en algunos sectores particulares del modelo (Figura 48). Específicamente en el sector este del modelo, hay varios sectores con presión positiva que coinciden con la presencia de pequeñas lagunas en superficie, las cuales se generan porque la topografía es sub-horizontal en la parte baja del modelo y porque la unidad superior del modelo está constituida por sedimentos glaciares semipermeables. Además, en el sector centro sur del modelo existe una zona amplia con presiones positivas que coincide bien con las lagunas más importantes en la cuenca del río Coyhaique, en las cercanías del Monumento Natural 2 Lagunas.

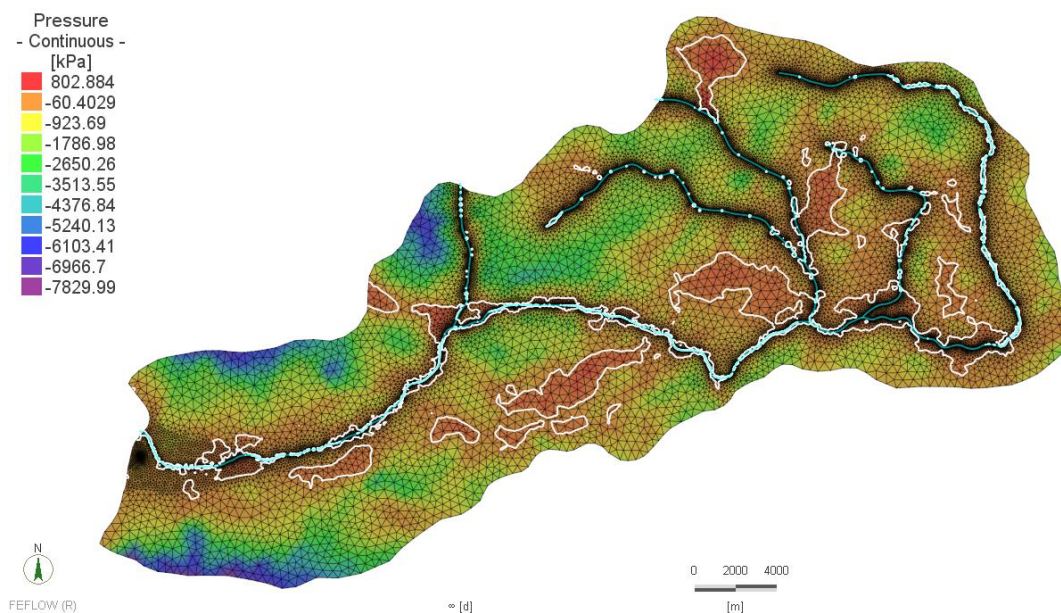


Figura 48. Presión de agua en la parte superior del modelo.

## Puntos de control (carga hidráulica)

En las cercanías de la ciudad de Coyhaique hay 3 pozos con información de nivel estático (Figura 21). Además, la interpretación de los perfiles verticales de resistividad eléctrica entrega una ubicación aproximada del nivel estático en 5 puntos ubicados en la ciudad de Coyhaique (Figura 15, Figura 16, Figura 17, Figura 18 y Figura 19). Con lo anterior se crearon 7 puntos de control con una medición (pozos)/estimación (TEM) de carga hidráulica que fueron utilizados para calibrar el modelo de flujo de agua subterránea (Figura 49). Para los valores de carga hidráulica, determinados a partir de la medición de nivel estático en pozos, se consideró un margen de error de 10m, mientras que para los valores de carga hidráulica determinados a partir de la interpretación de los perfiles verticales de resistividad eléctrica se consideró un margen de error de 15m. La Figura 50, muestra la correlación entre la carga hidráulica calculada por FEFLOW y la carga hidráulica medida/interpretada. En todos los puntos de control, el valor de carga hidráulica calculado por FEFLOW está dentro del rango previamente establecido.

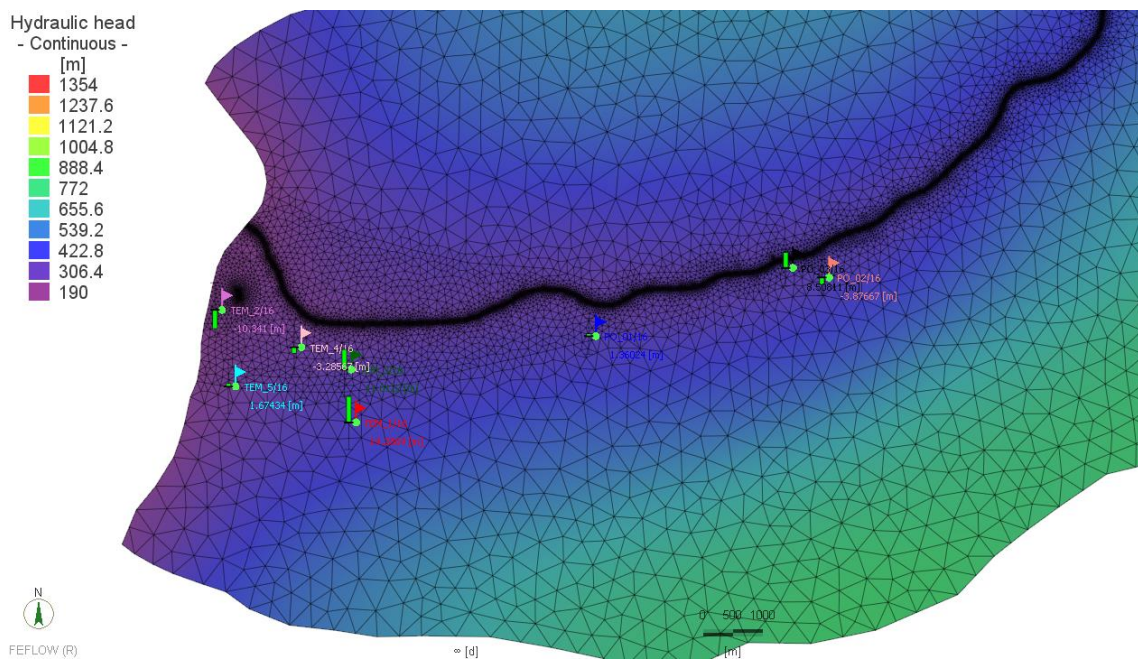


Figura 49. Ubicación de los puntos de control para la carga hidráulica.

De la relación entre la carga hidráulica calculada por FEFLOW y la carga hidráulica medida/estimada en los puntos de control, el error es mayor en el caso de los TEM, porque corresponden a una estimación indirecta, mientras que el error es menor en el caso de pozos, porque la estimación es directa.

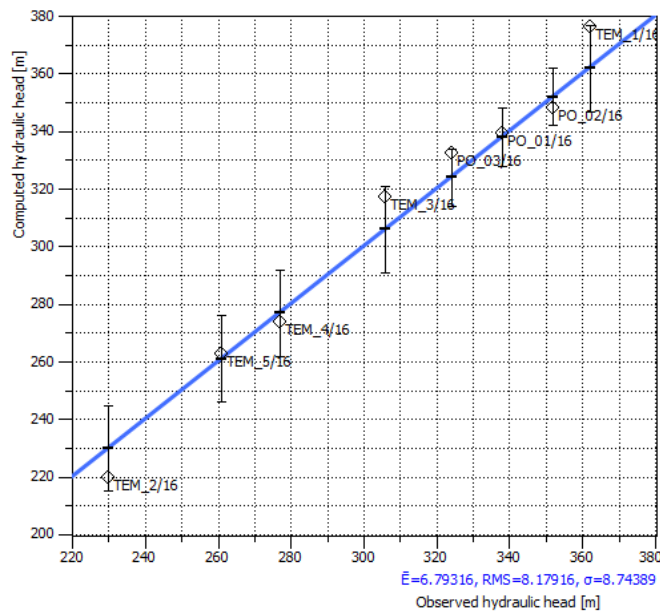


Figura 50. Relación entre la carga hidráulica calculada por FEFLOW y la carga hidráulica medida en los puntos de control.

### Balance de agua subterránea

El balance de agua subterránea, indica que a través del río salen del acuífero  $60.230\text{m}^3/\text{día}$  e infiltran desde el río al acuífero  $10.382\text{m}^3/\text{día}$ . La diferencia de agua, que queda en el río  $49.848\text{m}^3/\text{día}$  equivalente a  $\sim 0.6\text{m}^3/\text{s}$ , la cual es similar al caudal que se evacúa a través del río Coyhaique al fin del verano ( $1\pm 0,3\text{m}^3/\text{s}$ ) (Figura 9). Entonces, el aporte del acuífero al río Coyhaique coincide con el caudal del río en los meses de menor precipitación (fin del verano). El caudal en los ríos y esteros aumentan hasta un orden de magnitud en los meses de invierno (Tabla 2), porque los sedimentos glaciares son desfavorables para la infiltración y, por lo tanto, favorecen el escurrimiento de agua sobre la superficie (Cuthbert et al., 2010).

## 8 Transferencia de calor intercambiadores de calor verticales cerrados

A Continuación, se presentan los principales resultados para la transferencia de calor en el subsuelo, para la simulación de un sistema de climatización con bomba de calor geotérmica en el edificio del Gobierno Regional de Aysén.

### 8.1 Energía térmica transferida y disipada en el subsuelo

Como se mencionó anteriormente, cuando la bomba de calor funciona con propósitos de calefaccionar ambientes, la potencia que se extrae del suelo durante el funcionamiento, es la potencia que requiere el edificio menos la potencia que aporta el compresor de la bomba (ecuación 26). Por otro lado, cuando la bomba de calor funciona con propósitos de refrigerar ambientes, la potencia que se disipa en el suelo durante el funcionamiento, es la potencia que se extrae del edificio más la potencia que aporta el compresor de la bomba (ecuación 27). Con lo anterior, y de acuerdo al  $COP_{calefacción}$  4,2 y el  $COP_{refrigeración}$  5,6, se calculó la energía mensual que se capta desde el suelo para calefaccionar y se transfiere al suelo para refrigerar (Figura 51).

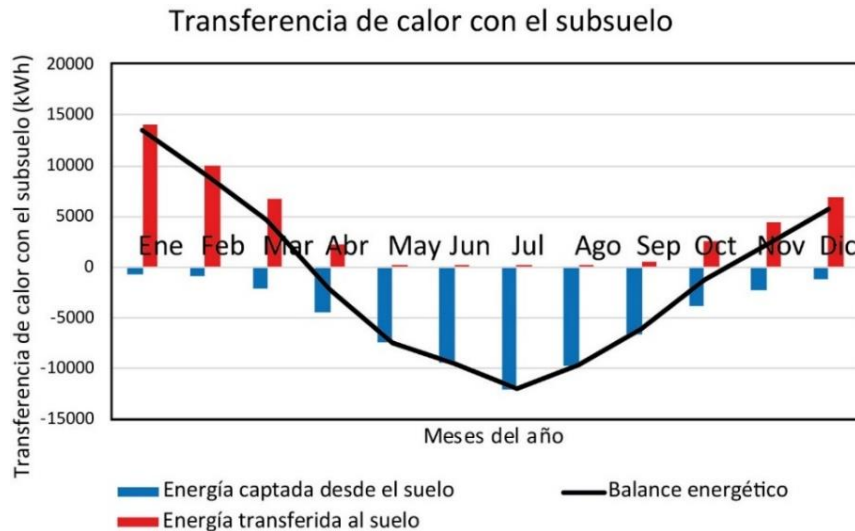


Figura 51. Energía transferida al suelo y captada desde el suelo a lo largo de un año.

Finalmente, para utilizar el método cuasi estacionario de la transferencia de calor entre los intercambiadores de calor y el subsuelo (Eskilson and Claesson, 1988), se consideró captar/disipar la energía de cada mes de manera homogénea como una potencia promedio *i.e.*, la energía mensual kWh dividida por el número de horas del mes (Tabla 10). El caudal asociado a la potencia promedio mensual captada/disipada en el subsuelo, se consideró como  $18\text{m}^3/\text{d}$  por kW térmico (FEFLOW-training-manual, 2016) (Tabla 10).

Tabla 10. Energía transferida al suelo y captada desde el suelo a lo largo de un año y potencia promedio mensual transferida/capta desde/hacia el suelo.

Mes	Energía captada desde el suelo [KWh]	Energía transferida al suelo [kWh]	Total energía captada/transferida desde/hacia el suelo [kWh]	Promedio potencia captada/transferida desde/hacia el suelo [kW]
Enero	-682	14124	13442	18,1
Febrero	-861	10076	9215	13,7
Marzo	-2032	6702	4670	6,3
Abril	-4443	2251	-2192	-3
Mayo	-7461	61	-7400	-10
Junio	-9482	6	-9476	-13,2
Julio	-12007	22	-11984	-16,1
Agosto	-9664	48	-9616	-13
Septiembre	-6609	485	-6124	-8,5
Octubre	-3816	2485	-1331	-1,8
Noviembre	-2255	4464	2208	3,1
Diciembre	-1151	6835	5683	7,6

## 8.2 Configuración del problema

El edificio del Gobierno Regional de Aysén se encuentra en el sector noroeste de la ciudad de Coyhaique, al oeste del dominio del modelo para el flujo de agua subterránea. En el área de interés, la altura topográfica es 269 msnm, la cota hidráulica es 225 msnm y la profundidad de las rocas de la Fm. Katterfeld se estima en ~80m (*i.e.* 189 msnm). Los resultados del modelo de transferencia de agua subterránea (Apartado 7) indican que el flujo de agua subterránea se mueve en dirección al noroeste y su velocidad en la cobertura sedimentaria es 0,003 [m/d], mientras que en las lutitas de la Fm. Katterfeld la velocidad del agua subterránea es 0,00015 [m/d].

### 8.2.1 Geometría y enmallado alrededor de los intercambiadores

En el área donde se ubican los intercambiadores de calor 2U, el enmallado es particular. El área que rodea los intercambiadores, tiene una densidad de elementos 30 veces mayor, respecto del resto del dominio. Además, alrededor de cada intercambiador se construyen elementos en forma de triángulos equiláteros de 45cm de arista (Diersch et al., 2011b) (Figura 52).

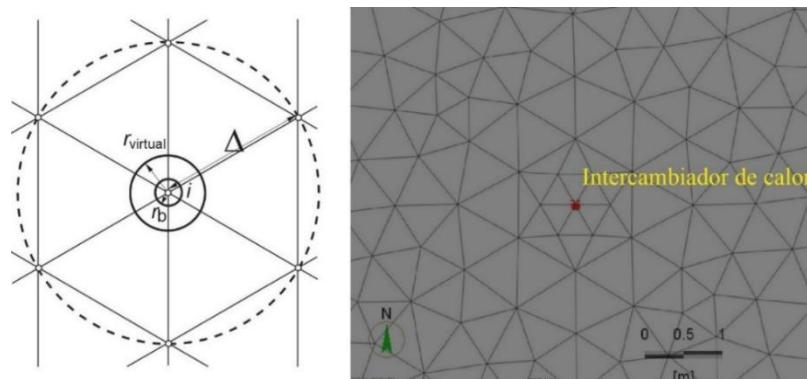


Figura 52. Enmallado para cada intercambiador de calor. Izquierda: puntos que conforman el intercambiador de calor vertical y elementos con forma de triángulos equiláteros a su alrededor (Diersch et al., 2011b). Derecha: enmallado alrededor de un intercambiador de calor vertical para el presente trabajo.

La distancia entre los intercambiadores de calor verticales en este trabajo es 8m. Lo anterior, tiene relación con la tendencia habitual o regulada en países donde esta tecnología es común. Por ejemplo, en el estado Alemán de Baden-Württemberg la distancia sugerida para intercambiadores de calor verticales es 10m. (Haehnlein et al., 2010), mientras que en Suiza se recomiendan 6-8m de separación (Molina-Giraldo et al., 2011).

### 8.2.2 Propiedades térmicas del subsuelo y los intercambiadores de calor verticales

El modelo está constituido por 2 capas, una capa superior compuesta de sedimentos de origen principalmente glacial y una capa inferior compuesta por lutitas de la Fm. Katterfeld. Para las Lutitas de la Fm. Katterfeld, la densidad, difusividad térmica y conductividad térmica fueron medidas en muestras representativas (Tabla 5). Para la capa compuesta por sedimentos de origen glacial las propiedades térmicas fueron estimadas de acuerdo al tipo de sedimento (Sarbu and Sebarchievici, 2016a). La dispersión longitudinal y transversal de calor por el flujo de agua fue estimada de acuerdo a la conductividad hidráulica de la cobertura sedimentaria y las lutitas de la Fm. Katterfeld (Molina-Giraldo et al., 2011). La Tabla 11, resume las propiedades térmicas del medio donde se modela la transferencia de calor entre los intercambiadores de calor verticales cerrados y el subsuelo.

Tabla 11. Propiedades térmicas del subsuelo y agua subterránea.

Porosidad sedimento glacial [%]	30
Porosidad Lutitas Fm. Katterfeld [%]	5
Capacidad calórica volumétrica sedimento glacial [MJ/m <sup>3</sup> °C]	1.75
Capacidad calórica volumétrica Lutitas Fm. Katterfeld [MJ/m <sup>3</sup> °C]	2.14
Capacidad calórica volumétrica agua [MJ/m <sup>3</sup> °C]	4,2
Conductividad térmica sedimento glacial [W/m°C]	1.75
Conductividad térmica Lutitas Fm. Katterfeld [W/m°C]	3
Conductividad térmica agua [W/m°C]	0,65
Dispersividad térmica longitudinal sedimento glacial [m]	2
Dispersividad térmica longitudinal Lutitas Fm. Katterfeld [m]	2
Dispersividad térmica transversal sedimento glacial [m]	0,2
Dispersividad térmica transversal Lutitas Fm. Katterfeld [m]	0,2

Las propiedades térmicas de los componentes del intercambiador de calor 2U y el fluido refrigerante, además de sus dimensiones en sección transversal, fueron determinadas de acuerdo a los valores sugeridos por los desarrolladores del software FEFLOW, porque son similares a los propuestas en la literatura (Sarbu and Sebarchievici, 2016a), solo se modificó el diámetro del intercambiador de calor a 0,12 [m], de acuerdo a valor típicos de perforación que resultan más económicos en el país.

### 8.3 Resultados transferencia de calor intercambiadores de calor verticales cerrados

Para calefaccionar y refrigerar el edificio del Gobierno Regional de Aysén son necesarios 8 intercambiadores de calor verticales 2U de 90m de profundidad, distanciados 8m. Con esta configuración la temperatura del fluido que entra a la bomba de calor siempre es mayor que 4°C, para el primer año de funcionamiento, por lo que la bomba de calor geotérmica siempre funcionará en condiciones nominales o mejores (temperatura de entrada mayor que 0°C). Por otro lado, cuando se refrigera, la temperatura del suelo no sube más que 15,5°C, entonces la bomba de calor geotérmica siempre funcionará en condiciones nominales o mejores (temperatura de entrada menor que 20°C).

#### 8.3.1 Registro de temperaturas 1 año de funcionamiento

La Figura 53, muestra el registro de temperaturas que entran y salen del arreglo de intercambiadores de calor verticales a lo largo de un año. En el verano, la temperatura que entra al arreglo de intercambiadores de calor sube hasta 17°C y justo en este momento la temperatura del refrigerante a la salida del arreglo es de 15,°C (temperatura entrada bomba de calor). Entonces, se espera un rendimiento óptimo para el funcionamiento del sistema de refrigeración en verano. Desde el fin del verano y hasta el fin del invierno la temperatura del refrigerante al interior del arreglo intercambiadores de calor baja paulatinamente hasta entrar a 3°C y justo en este momento la temperatura del refrigerante a la salida del arreglo de intercambiadores es 4°C (temperatura entrada bomba de calor). Entonces, se espera un rendimiento óptimo para el funcionamiento del sistema de calefacción en el invierno.

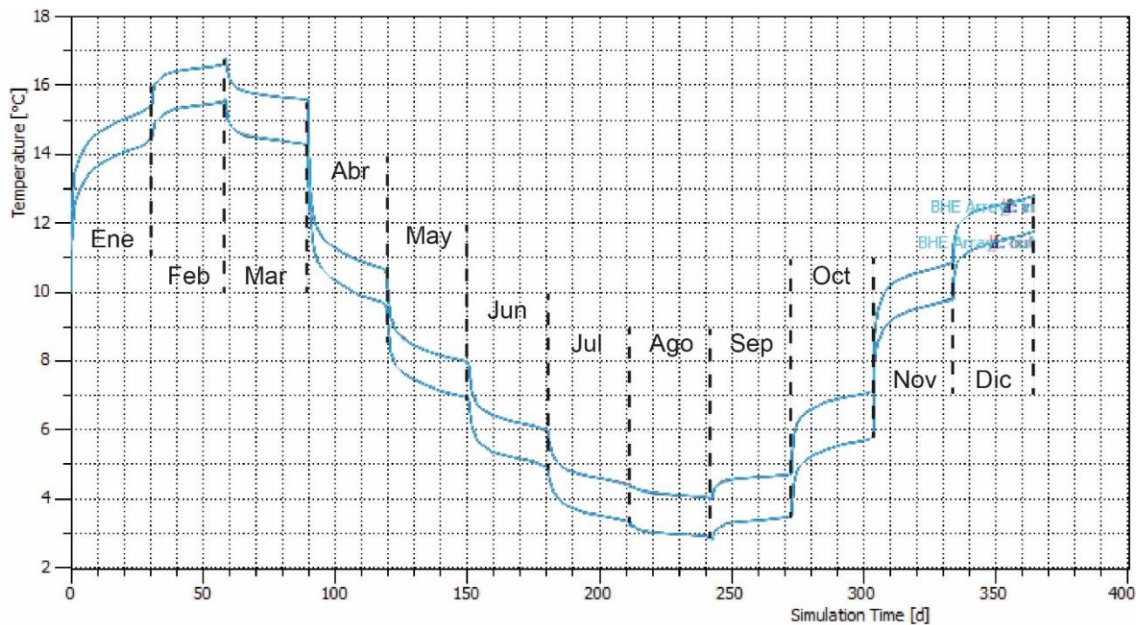


Figura 53. Registro de temperatura del fluido refrigerante que entra y sale del arreglo de intercambiadores de calor a lo largo de un año.

Durante el funcionamiento del sistema de climatización, la temperatura del borde externo del mortero de cada uno de los intercambiadores de calor (temperatura del subsuelo en el mismo punto) se calienta hasta llegar a 14°C en la base de los intercambiadores de calor durante el verano (Figura 54 - Día 47 del año). Luego disminuye paulatinamente hasta el fin del invierno donde la temperatura del mortero alcanza 4°C en la parte superior del arreglo de intercambiadores de calor (Figura 54 - Día 240 del año).

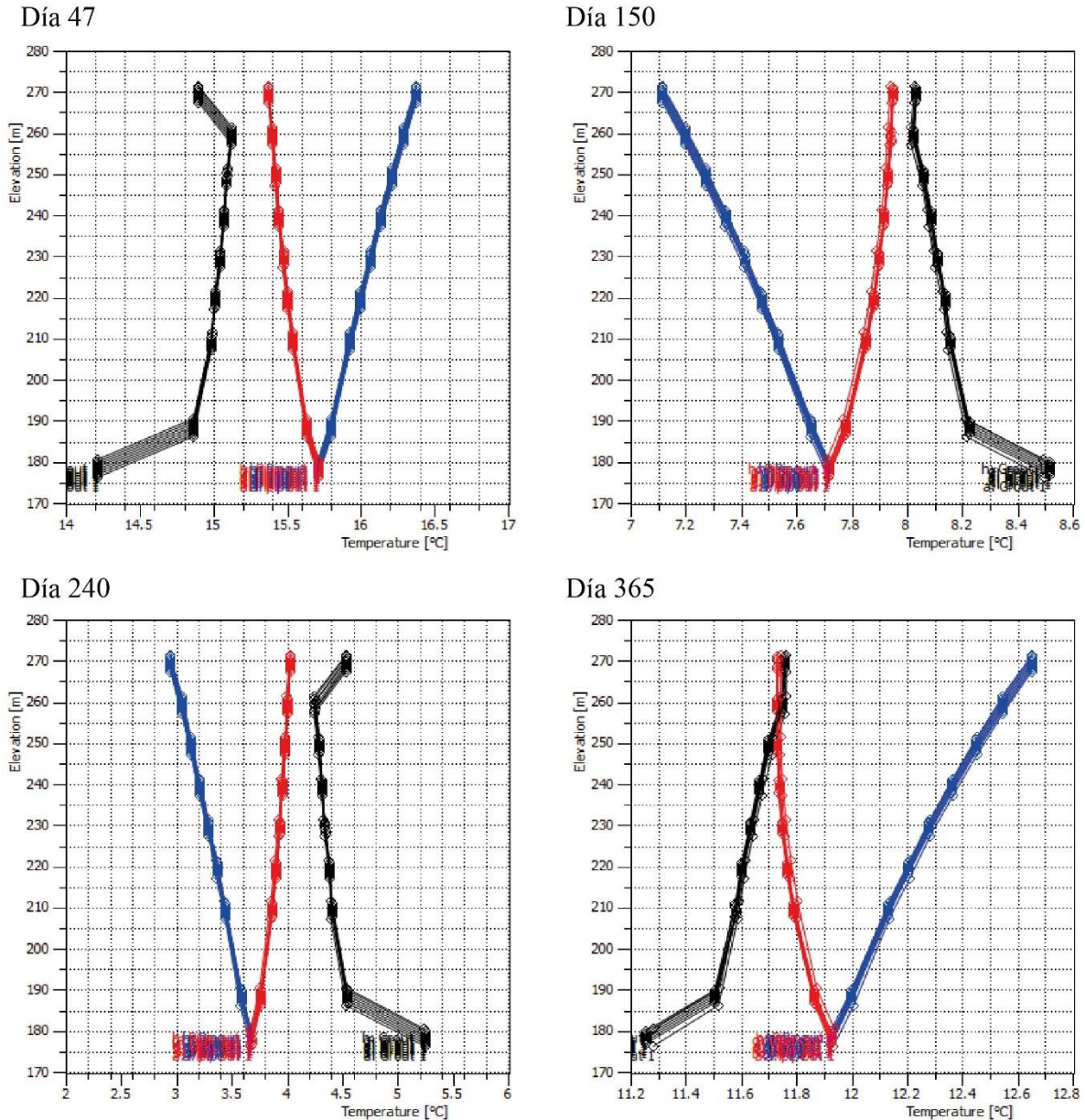


Figura 54. Perfil de temperatura en los intercambiadores de calor verticales tipo 2U. Las líneas azules indican temperatura de entrada del refrigerante a los intercambiadores de calor. Las líneas rojas indican temperatura de salida del refrigerante a los intercambiadores de calor (temperatura de entrada a la bomba de calor). Las líneas negras indican la temperatura del mortero. La elevación [m], indica la altitud en el dominio [msnm].



### 8.3.2 Registro de temperatura después de 25 años de funcionamiento

Luego de 25 años de funcionamiento, la temperatura del suelo y, por lo tanto, la temperatura de entrada y salida del refrigerante al arreglo de intercambiadores de calor se enfría  $1^{\circ}\text{C}$  (Figura 55). De acuerdo al registro de temperatura de entrada y salida del refrigerante al arreglo de intercambiadores, las temperaturas máximas y mínimas anuales bajan continuamente hasta el día  $\sim 3700$  de funcionamiento ( $\sim 10$  años). Luego de esto, las temperaturas máximas y mínimas anuales del refrigerante son similares para cada año.

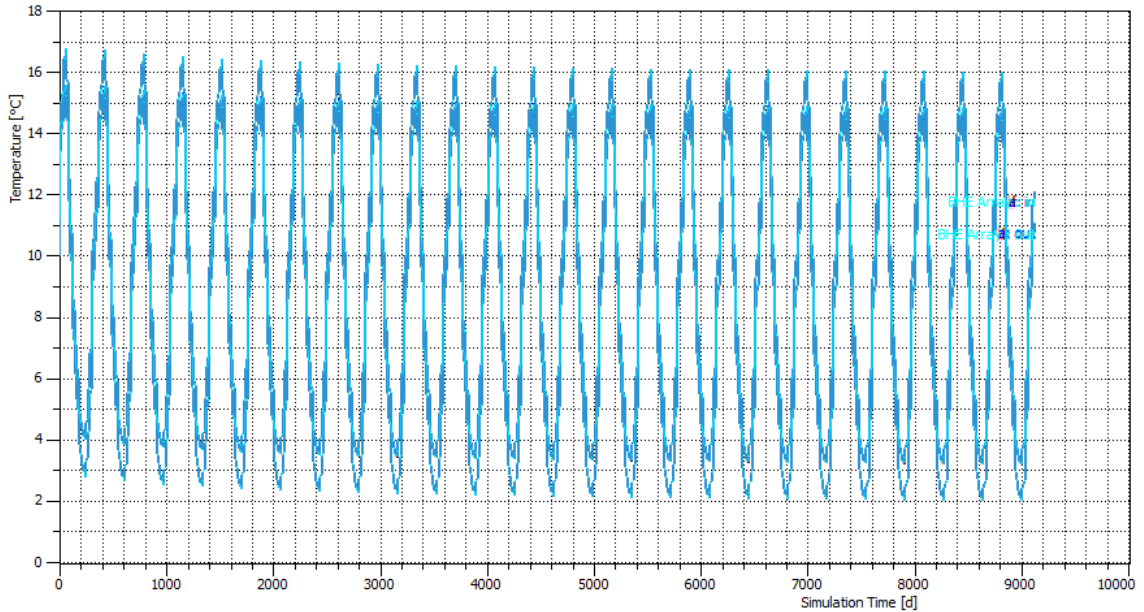


Figura 55. Registro de temperatura del fluido refrigerante que entra y sale del arreglo de intercambiadores de calor a lo largo de 25 años de funcionamiento.

La temperatura del refrigerante al interior del intercambiador de calor baja hasta  $2^{\circ}\text{C}$ . Esto es mejor que la recomendación del (RETScreen, 2005), donde se recomienda que la temperatura del refrigerante a la entrada de la bomba de calor no baje menos que  $8,3^{\circ}\text{C}$ , respecto de la temperatura del suelo *i.e.*, no debería bajar a temperaturas menores que  $1,7^{\circ}\text{C}$  en el caso de Coyhaique. Además, durante el funcionamiento del sistema la temperatura del mortero tampoco baja de  $2^{\circ}\text{C}$ , por lo que se evita el congelamiento del subsuelo, que podría alterar el normal funcionamiento del sistema.

El registro de temperatura en superficies sub-horizontales en profundidad, después de 25 años de funcionamiento del sistema (Figura 56), indica que la zona de afectación termal creada por la transferencia de calor de los intercambiadores de calor varía con la profundidad. A los 50m de profundidad alcanza su máxima extensión, en el relleno sedimentario de origen glacial y 16m por debajo del nivel estático. A esta profundidad, el suelo baja su temperatura al menos  $0,5^{\circ}\text{C}$ , hasta una distancia que llega hasta 20m del arreglo de intercambiadores de calor en la dirección del flujo de agua subterránea. Además, el área con una temperatura menor que  $9^{\circ}\text{C}$  alcanza su máxima extensión a 8m del arreglo de intercambiadores de calor en la dirección del flujo de agua subterránea.

El número de *Péclet*  $Pe$  indica la relación entre la tasa de transferencia de calor por advección por el flujo de agua, respecto de la tasa de transferencia de calor por conducción en un medio poroso (Ingebritsen and Sanford, 1999). De acuerdo a Signorelli et al. (2007), si  $Pe > 1$ , la advección de calor es importante en la transferencia de calor. A continuación, la expresión para el número de *Péclet*  $Pe$ :

$$Pe = \frac{q\Delta L\rho^f c^f}{\lambda^a} \quad (46)$$

Donde,  $q$  es la velocidad del agua subterránea [m/s],  $\Delta L$  largo característico [m],  $\rho^f$  densidad del fluido [kg/m<sup>3</sup>],  $c^f$  capacidad calorífica del fluido y  $\lambda^a$  es la conductividad térmica del volumen total de la unidad geológica [W/m°C]. En el relleno sedimentario, el  $\Delta L$  corresponde a la distancia entre los intercambiadores de calor *i.e.*, 8m, entonces el  $Pe = 0.5 \sim 1$ , lo que implica influencia de la advección de calor (Figura 56: 50m de profundidad). De la misma manera, para las lutitas de la formación Katterfeld el  $\Delta L$  corresponde es 10m, entonces el el  $Pe = 0,055 < 1$ , lo que implica que la advección de calor no es significativa (Figura 56: 80m de profundidad).

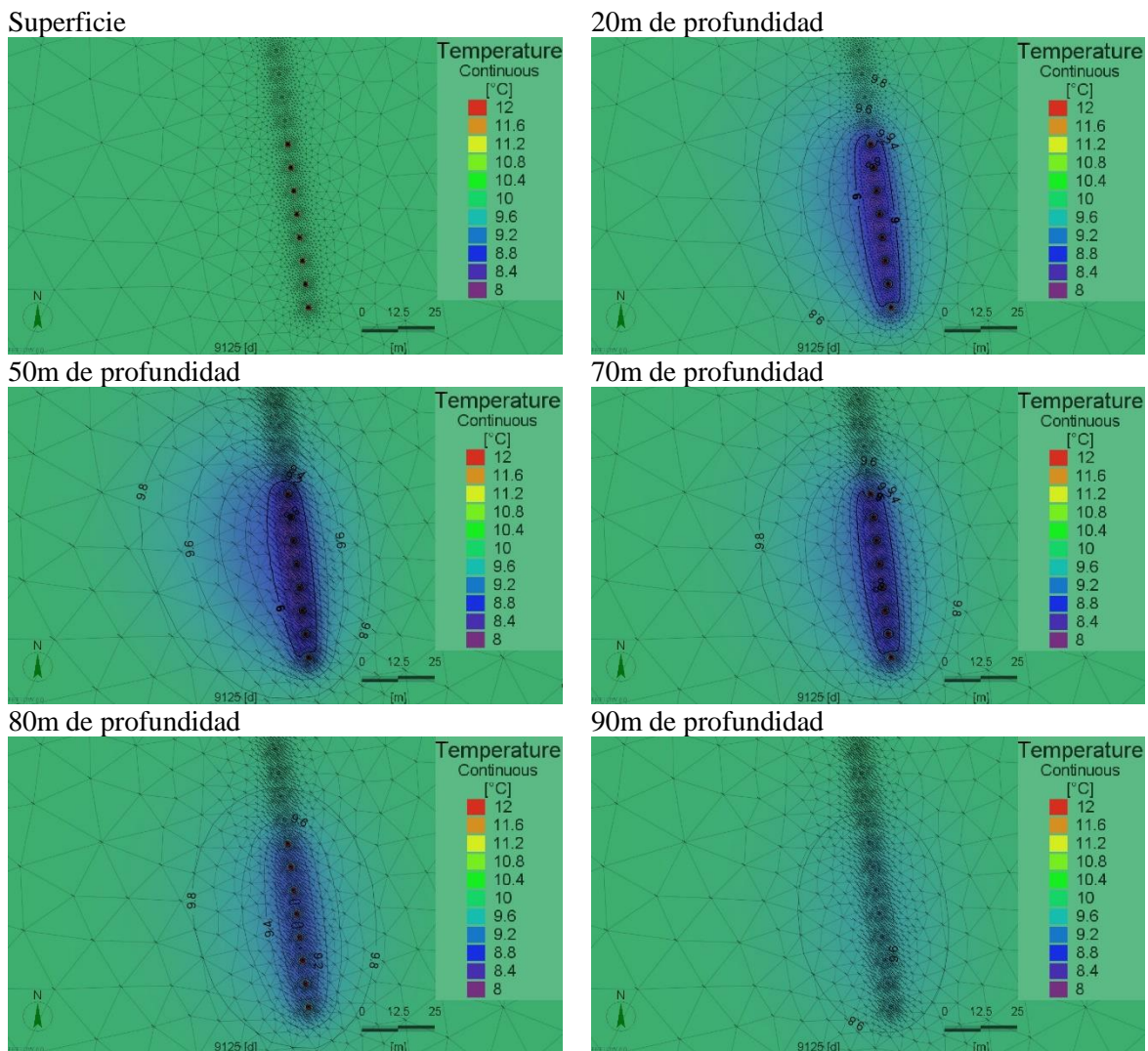


Figura 56. Zona de afectación termal creada por el funcionamiento del arreglo de intercambiadores de calor después de 25 años de funcionamiento.

## 9 Análisis de inversión inicial y costo de operación

Se realiza un análisis de la inversión inicial y el costo de operación del sistema de climatización con bomba de calor geotérmica en el edificio del Gobierno Regional de Aysén. Específicamente, se estima el Tiempo de Retorno de la Inversión al comparar geotermia con un equipo de aire acondicionado convencional. Estos sistemas de climatización son comparables, porque entregan soluciones idénticas en calidad y representan una mantención similar. La gran diferencia entre estos sistemas de climatización está en el costo adicional que representan los intercambiadores de calor verticales cerrados de la bomba de calor geotérmica.

No se considera el sistema de distribución de temperatura, porque ambas alternativas comparten el mismo sistema de distribución de calor y frío. Otros aspectos de la implementación, tales como la ampliación del empalme eléctrico o la sala para los equipos se consideran similares, porque sus diferencias son despreciables respecto de la construcción de los intercambiadores de calor verticales cerrados.

### 9.1 Inversión inicial y costos de mantención Geotermia

La inversión inicial contempla los intercambiadores de calor y la bomba de calor agua-agua. Los precios fueron tomados de (Precios-Chile, 2017) y modificados de acuerdo a cotizaciones de empresas privadas que trabajan en la región de Aysén.

El costo total de los intercambiadores de calor (Tabla 12), contempla la perforación de 8 pozos de 90m de profundidad y la instalación de 8 intercambiadores del tipo 2U al interior de los pozos. El detalle de precios de los componentes de los intercambiadores de calor está en las Tablas Tabla A-22, Tabla A-23 y Tabla A-24.

Tabla 12. Costo de los intercambiadores de calor verticales cerrados tipo 2U.

Intercambiadores de calor verticales cerrados tipo 2U				
	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Total
Traslado equipos	día	6	\$617.987	\$3.707.922
Perforación	1 [m]	720	\$116.106	\$83.596.320
Sonda geotermia	Sonda doble	8	\$1.510.597	\$12.084.776
Total intercambiadores				\$99.389.018

El costo de la bomba de calor agua-agua, del sistema geotérmica es \$24.665.363. Lo anterior, sumado al precio de los intercambiadores de calor verticales cerrados, resultan en una inversión inicial para el sistema geotérmico de \$124.054.381. El costo de mantención anual, de los equipos por los primeros 10 años es \$1.578.473 anual (Tabla A-25).

### 9.2 Rendimiento, inversión inicial y costos de mantención del aire acondicionado convencional

Las bombas de calor aire-agua (aire acondicionado convencional), entregan una solución de climatización de igual calidad que las bombas de calor geotérmicas. Sin embargo, la eficiencia de las bombas de calor aire-agua es menor, por lo que tienen costos de operación mayor que la geotermia. Por otro lado, las bombas de calor aire-agua no requieren una intervención del subsuelo, y simplemente se conectan al sistema de climatización.

El rendimiento del aire acondicionado convencional se estimó de acuerdo a catálogos de bombas de calor aire-agua. Para el caso de calefacción el  $COP_{calefacción}$  A2/W35 es 3,6 de acuerdo a la normativa EN 14511. Por otro lado, para el caso de refrigeración el  $COP_{refrigeración}$  A27/W9 tiene un valor típico de 2.8 (Dimplex-LA60TUR+, 2017).

La inversión inicial en del acondicionado convencional consiste solo en la bomba de calor aire-agua. El precio fue tomado de (Precios-Chile, 2017). El costo de la bomba de calor aire-agua, del sistema de climatización con aire acondicionado convencional es \$24.504.850. El costo de mantención anual, de los equipos por los primeros 10 años es \$1.568.591 anual (Tabla A-26).

### 9.3 Tiempo de retorno de la inversión Geotermia vs aire acondicionado convencional

Para determinar el Tiempo de Retorno de la Inversión (TRI), se consideran los ahorros en el gasto de operación de la bomba de calor geotérmica, respecto del acondicionado convencional. Para determinar el gasto promedio mensual del funcionamiento del sistema con geotermia y aire acondicionado convencional, se considera el estimador de precios de Edel Aysén (SAESA, 2017). La Tabla 13 muestra el consumo eléctrico del sistema de climatización con geotermia y aire acondicionado convencional de acuerdo a el rendimiento de los equipos. Para estimar el precio de la energía eléctrica se considera la tarifa eléctrica BT4-3, porque es la tarifa que actualmente tiene este edificio.

Tabla 13. Consumo energético anual y promedio mensual para climatizar el edificio del Gobierno Regional de Aysén con geotermia y aire acondicionado convencional.

Mes	Consumo Geotermia	Potencia máxima	Costo promedio mensual	Consumo Aire acondicionado convencional	Potencia máxima	Costo promedio mensual
	KWh	KW	\$	KWh	KW	\$
Enero	2353	15	417.173	4642	30	798.023
Febrero	1796	15	417.173	3510	30	798.023
Marzo	1650	15	417.173	3110	30	798.023
Abril	1729	19	417.173	3042	23	798.023
Mayo	2341	19	417.173	3982	23	798.023
Junio	2964	19	417.173	5039	23	798.023
Julio	3755	19	417.173	6385	23	798.023
Agosto	3027	19	417.173	5149	23	798.023
Septiembre	2139	19	417.173	3658	23	798.023
Octubre	1569	19	417.173	2780	23	798.023
Noviembre	1381	15	417.173	2551	30	798.023
Diciembre	1395	15	417.173	2683	30	798.023
Total			6.496.901			9.576.271

Considerando que la inversión inicial de la bomba de calor agua-agua (sistema geotermia) y la bomba aire-agua (aire acondicionado convencional) tienen costos de inversión similares (ver Tabla A-25 y Tabla A-26 de los Anexos), la principal diferencia de precio en la inversión inicial entre los sistemas está dado por los intercambiadores de calor verticales cerrados. Entonces, considerando que el ahorro económico anual es de \$3.079.370 y que el costo de los intercambiadores de calor verticales en este caso es de \$99.389.018, el Tiempo de Retorno de la Inversión TRI es ~32 años.

## 10 Discusiones y alcances de los resultados

### 10.1 Recursos hídricos superficiales

El registro de recursos hídricos superficiales está incompleto y no permite determinar de manera certera condiciones de borde como la infiltración de agua en la parte superior del modelo. Lo anterior, es porque existen solo 3 estaciones meteorológicas que por su distribución no permiten predecir de manera adecuada variaciones en la distribución espacial de las precipitaciones pluviales y no tienen registro de la precipitación de nieve. Lo anterior, solo permite estimar órdenes de magnitud para la infiltración y, por lo tanto, dificultan la calibración del modelo de flujo de agua subterránea.

Respecto del río Coyhaique y sus afluentes, en la cuenca del río Coyhaique existe solo una estación fluviométrica, ubicada en el borde este de la ciudad Coyhaique. Lo anterior, permite calibrar el modelo en la cercanía de la ciudad de Coyhaique. Sin embargo, la falta de información en el sector centro y este de la cuenca, no permite calibrar detalladamente la interacción del río Coyhaique y sus afluentes con el acuífero.

### 10.2 Geometría del modelo

La geometría de las unidades que constituyen el modelo, supone que la cobertura de sedimentos de origen glacial y las lutitas de la Fm. Katterfeld se extienden con una potencia casi constante para el caso de los sedimentos y con una potencia constante para el caso de las lutitas. Esto es una buena aproximación para calibrar el modelo con condiciones de borde alejadas del área de interés (ciudad de Coyhaique) y generar una solución consistente con los que se observa en la ciudad de Coyhaique y sus alrededores (Figura 50). Además, la solución del modelo para la transferencia de agua refleja bien las características de escala regional en la cuenca del río Coyhaique (e.g. sectores con lagunas) (Figura 48).

La configuración del modelo supone que bajo la cobertura de sedimentos glaciares está la Fm. Katterfeld (compuesta por lutitas). Lo anterior, porque es la unidad geológica más ampliamente distribuida bajo la cobertura de sedimentos en la ciudad (ver mapa geológico Figura 2 y estratigrafía de pozos cercanos a la ciudad de Coyhaique Figura 11). Sin embargo, existen diversos cuerpos intrusivos en la cuenca del río Coyhaique y la ciudad (ver mapa geológico Figura 2). Entonces, las simulaciones de transferencia del flujo de agua subterránea y de calor presentadas en este trabajo, representan la situación más probable. No obstante, esta solución se puede modificar dependiendo de variaciones locales en la configuración del basamento rocoso.

La información del subsuelo en la cuenca del río Coyhaique es escasa, en particular en la ciudad de Coyhaique la información de subsuperficie proviene principalmente de medidas indirectas (Perfiles verticales de resistividad eléctrica Figura 15, Figura 16, Figura 17, Figura 18 y Figura 19). Por lo tanto, la distribución de unidades geológicas en profundidad para el caso de intercambiadores verticales cerrados debe ser ajustada con pozos en el lugar donde se este sistema de climatización sea implementado.

### 10.3 Propiedades hidráulicas y térmicas de las unidades del modelo

Las propiedades hidráulicas fueron medidas en el caso de las lutitas de la Fm. Katterfeld y determinadas de acuerdo al tipo de sedimento para la cobertura de depósitos no consolidados. Sin embargo, considerando la escala de la transferencia de agua subterránea y la transferencia de calor entre los intercambiadores de calor y el subsuelo, lo ideal es contar con pruebas de gasto constante, en pozos de profundidad similar a la escala del modelamiento, para definir de manera más rigurosa las propiedades hidráulicas del subsuelo.

Las propiedades térmicas fueron medidas en el caso de las lutitas de la Fm. Katterfeld y determinadas de acuerdo al tipo de sedimento para la cobertura de depósitos no consolidados. Con estos valores y el modelo de transferencia de agua subterránea se planifican los intercambiadores de calor verticales cerrados dependiendo de la potencia máxima y energía que se pretende captar o transferir al subsuelo. Sin embargo, para determinar con exactitud la potencia térmica y energía que se puede transferir o captar desde el subsuelo mediante intercambiadores de calor verticales cerrados, lo ideal es construir al menos 1 intercambiador de calor en el área de interés y realizar un Test de Respuesta Térmica.

### 10.4 Modelo de agua subterránea

El modelo de transferencia de agua subterránea fue calibrado con los datos disponibles y asumiendo propiedades hidráulicas de las unidades geológicas de acuerdo al tipo de medio que compone el modelo (sedimento glacial y rocas sedimentarias). La falta de condiciones de borde más acotadas en el modelo (*e.g.* recarga del acuífero) produce un rango de soluciones posibles, dentro de las cuales la solución final es la más consistente con el contexto de hidrogeológico la cuenca y con observaciones de escala regional. El modelo fue calibrado con énfasis en la ciudad de Coyhaique y sus alrededores, porque justamente en la ciudad de Coyhaique se realizó el modelo de transferencia de calor de intercambiadores de calor verticales cerrados.

### 10.5 Modelo de transferencia de calor de los intercambiadores de calor verticales cerrados

El principal objetivo del modelo de transferencia de calor entre los intercambiadores de calor verticales cerrados y el subsuelo es dimensionar de manera adecuada el tamaño de las instalaciones subterráneas de una bomba de calor geotérmica. El correcto dimensionamiento de los intercambiadores de calor verticales depende de los siguientes factores:

- Carga térmica del sistema de climatización: Los intercambiadores de calor deben ser adecuados para captar o transferir la energía al subsuelo y entregar condiciones de operación óptimas de funcionamiento a la bomba de calor agua-agua en los momentos de máximo requerimiento energético de calefacción y refrigeración.
- Demanda energética: En la medida que se extrae o transfiere energía térmica al subsuelo, este se enfría o calienta progresivamente. Por lo tanto, al fin de cada invierno y verano el subsuelo alrededor de los intercambiadores de calor llega a su máximo enfriamiento y calentamiento, respectivamente. En este contexto es importante que al fin de las temporadas de invierno y verano el subsuelo aún tenga la capacidad de transferir calor con el intercambiador de calor y lograr temperaturas del refrigerante que garanticen condiciones óptimas de funcionamiento en la bomba de calor agua-agua.

- Horario de uso del sistema: la cantidad total de energía que se extrae o transfiere al subsuelo afecta de manera proporcional al número y tamaño de intercambiadores de calor verticales cerrados. Por otro lado, la demanda de energía está fuertemente condicionada por las ganancias solares y, por lo tanto, la hora del día en que se ocupa el sistema (*e.g.* durante las tardes o las noches). En el caso particular de este trabajo, el sistema de climatización del edificio funciona principalmente durante las mañanas y las tardes, por lo que su factor de planta de 11,2% en modo calefacción y 5,4% en modo refrigeración. Entonces, este trabajo es solo comparable a edificios con propósitos similares *i.e.*, que funcionen principalmente durante las mañanas y tardes (*e.g.* colegios y oficinas). Considerando que el sistema geotérmico permite calentar y refrigerar ambientes, se planificó y modeló de esta manera. No refrigerar durante las horas del día que lo ameriten lleva a una mayor disminución de la temperatura del subsuelo en el largo plazo. A modo de ejemplo, se modela el sistema solo en modo de calefacción. La Figura 57, muestra la disminución de la temperatura del refrigerante al interior del arreglo de intercambiadores de calor, además de interferencia térmica, después 25 años de funcionamiento. La situación es más desfavorable que el caso de estudio que considera calentar y refrigerar (Figura 55), por lo que se necesitan más intercambiadores de calor de similares características para lograr condiciones de operación nominales en la bomba de calor agua-agua durante los inviernos.

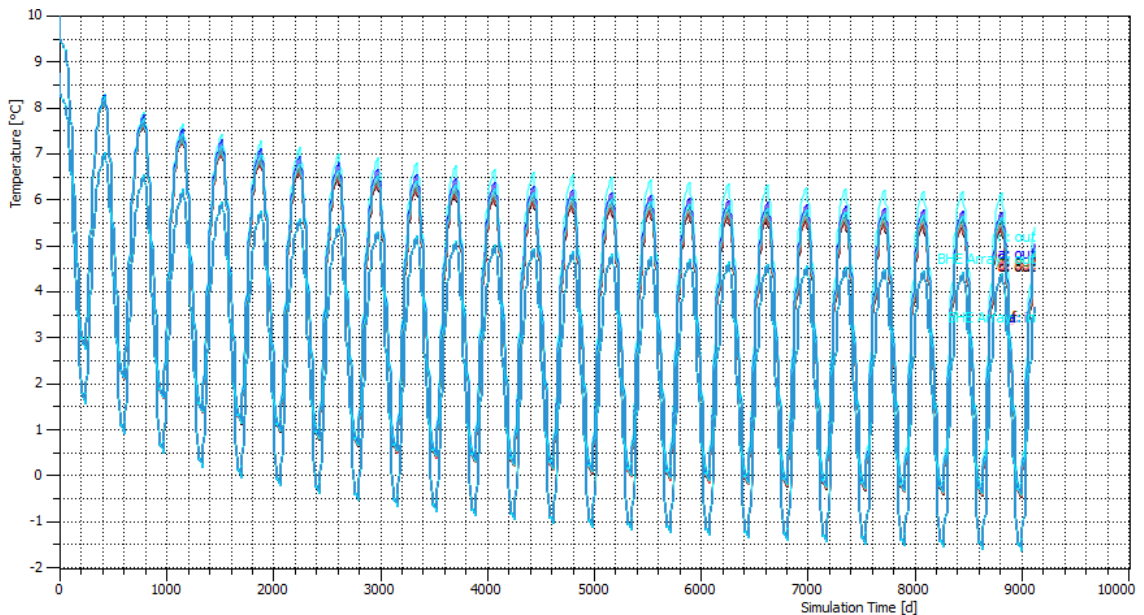


Figura 57. Registro de temperatura del fluido refrigerante que entra y sale del arreglo de intercambiadores de calor a lo largo de 25 años de funcionamiento solo en modo de calefacción.

## 10.6 Evaluación económica

La evaluación económica está fuertemente condicionada por el precio de los intercambiadores de calor, por lo que el número y tamaño de intercambiadores debe ser realizado de manera adecuada y así no sobredimensionar el sistema (aumenta la inversión inicial) y tampoco subdimensionar el sistema (bajar la eficiencia de la bomba de calor agua-agua).

En Chile el mercado de bombas de calor geotérmicas es incipiente, por lo tanto, la relación de calidad vs precio todavía no es clara y la comparación de los sistemas geotérmicos con alternativas convencionales muchas veces no es igual respecto de la calidad de las soluciones que se ofrecen. En este contexto, es vital contar con más ejemplos exitosos de bombas de calor geotérmicas, para generar estadísticas claras que permitan su comparación con alternativas convencionales.

El contrato eléctrico afecta el costo de operación de las alternativas que requieran electricidad en su funcionamiento, por lo que un estudio particular debe realizarse para elegir la tarifa eléctrica si el sistema de climatización ocupa electricidad.

Finalmente, aunque no fue abordado en este trabajo, el ahorro energético en el funcionamiento de la bomba de calor geotérmica, respecto del aire acondicionado convencional no tiene solo implicancias en el ámbito económico, porque las emisiones de gases efecto invernadero que dependen directamente de la generación de electricidad, disminuyen de manera proporcional con la disminución del consumo de energía eléctrica. De acuerdo a los datos de la Fundación Chile para la administración del carbón y considerando la matriz de generación eléctrica en la región de Aysén, se disminuye de 46.537 tCO<sub>2</sub> a 26.098 tCO<sub>2</sub>, al ocupar geotermia en lugar de aire acondicionado convencional.



## 11 Conclusiones

De acuerdo con el modelo de flujo de agua subterránea en la cuenca del río Coyhaique, la cobertura sedimentaria constituye un medio semipermeable, donde el agua se mueve lentamente  $\sim 0,003$  [m/día]. Además, las lutitas de la Fm. Katterfeld constituyen un medio impermeable, donde el agua se mueve  $\sim 0,00015$  [m/día]. En este contexto, es imposible implementar sistemas de climatización con bomba de calor geotérmica y colectores verticales abiertos. Considerando que la ciudad de Coyhaique tiene una reducida disponibilidad de espacio horizontal, para el caso de cargas térmicas y demandas energéticas de edificios se recomiendan los sistemas verticales cerrados.

Una vez establecido el contexto hidrogeológico del subsuelo y con las propiedades térmicas de las unidades que lo constituyen, los factores más influyentes en el dimensionamiento de los intercambiadores de calor verticales cerrados son la carga térmica del edificio y su demanda energética, la cual a la vez está condicionada por el momento del día en que se ocupa el sistema. Es importante calentar y refrigerar con el sistema de climatización, para renovar la temperatura del subsuelo después de las épocas de mayor demanda en el año (invierno y verano).

Para el caso del edificio del gobierno regional de Aysén, el sistema de climatización geotérmico con intercambiadores de calor verticales cerrados del tipo 2U, es técnicamente sustentable con 8 intercambiadores de 90m de profundidad. Lo anterior, para entregar calefacción y refrigeración con un factor de planta de 11,2% en modo calefacción y 5,4% en modo refrigeración. Después de 10 años de funcionamiento, los intercambiadores de calor verticales cerrados y el subsuelo superan la inercia térmica del sistema y, por lo tanto, a partir del año 10 las temperaturas mínimas de invierno y máximas del verano en el subsuelo son similares cada año. La zona de afectación térmica por el funcionamiento de los intercambiadores de calor verticales cerrados genera un enfriamiento de hasta  $0,5^{\circ}\text{C}$  a una distancia máxima de 20m de los intercambiadores de calor, en la dirección del flujo de agua subterránea, por lo tanto, el funcionamiento del sistema no afecta el recurso geotérmico de los vecinos. Al mismo tiempo, la temperatura del suelo y del fluido que circula al interior de los intercambiadores de calor, no baja de  $2^{\circ}\text{C}$ , evitando así problemas técnicos en el funcionamiento del sistema.

En el relleno sedimentario, el transporte de calor en el subsuelo tiene una componente conductiva a través de la matriz porosa y advectiva por el efecto del flujo de agua subterránea. Por otro lado, en las rocas del basamento, que en este caso corresponde a lutitas de la Fm. Katterfeld, el transporte de calor es casi exclusivamente por conducción.

Finalmente, los ahorros económicos debido al buen rendimiento del sistema de climatización con bomba de calor geotérmica, no son suficientes para obtener un tiempo de retorno de la inversión razonable. Lo anterior, debido al elevado costo de inversión inicial, por la perforación de pozos. Entonces, el tiempo de retorno de la inversión respecto del aire acondicionado convencional es  $\sim 32$  años. Sin embargo, es importante considerar que esta solución es novedosa en el país y, por lo tanto, implica una elevada inversión inicial en los primeros prototipos de la tecnología.

## Bibliografía

- Agromet, 2017, Red Agroclimática Nacional:
- Al-Khoury, R., and Bonnier, P.G., 2006, Efficient finite element formulation for geothermal heating systems. Part II: transient: *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v. 67, no. 5, p. 725–745, doi: 10.1002/nme.1662.
- Arqueros, C., 2004, Evolución Glacial de la hoya del río Coihaique: Una aproximación a partir del análisis geomorfológico y morfoestratigráfico: Universidad de Chile, 114 p.
- ASHRAE, 2009, Guide to fundamentals: American Society for Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, USA.
- ASHRAE, 1985, Handbook, fundamentals.:
- Bauer, D., Heidemann, W., Müller-Steinhagen, H., and Diersch, H.-J.G., 2011, Thermal resistance and capacity models for borehole heat exchangers: *International Journal of Energy Research*, v. 35, no. 4, p. 312–320, doi: 10.1002/er.1689.
- Bustamante, W., Encinas, F., Rozas, Y., and Victorero, F., 2006, Desarrollo de la herramienta de certificación del comportamiento térmico de edificios de Chile: Fundamentos técnicos.:
- Castillo, C., 2001, Estadística climatología Tomo III.:
- Cuthbert, M.O., Mackay, R., Tellam, J.H., and Thatcher, K.E., 2010, Combining unsaturated and saturated hydraulic observations to understand and estimate groundwater recharge through glacial till: *Journal of Hydrology*, v. 391, no. 3–4, p. 263–276, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.025>.
- Darcy, H., 1856, Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon: Dalmont, Paris.
- DGA-Reportes, 2017, Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea:
- Diersch, H.-J., 2014, Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Diersch, H.-J.G., Bauer, D., Heidemann, W., Rühaak, W., and Schätzl, P., 2011a, Finite element modeling of borehole heat exchanger systems: Part 1. Fundamentals: *Computers & Geosciences*, v. 37, no. 8, p. 1122–1135, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2010.08.003>.
- Diersch, H.-J.G., Bauer, D., Heidemann, W., Rühaak, W., and Schätzl, P., 2011b, Finite element modeling of borehole heat exchanger systems: Part 2. Numerical simulation: *Computers & Geosciences*, v. 37, no. 8, p. 1136–1147, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2010.08.002>.
- Dimplex-LA60TUR+, 2017, Catálogo bomba de calor aerotermia Dimplex-LA60TUR+: , p. 4.
- Dimplex-SI130TUR+, 2017, Catálogo bomba de calor geotérmica Dimplex SI 130TUR+: , p. 4.
- Eskilson, P., and Claesson, J., 1988, SIMULATION MODEL FOR THERMALLY INTERACTING HEAT EXTRACTION BOREHOLES: *Numerical Heat Transfer*, v. 13, no. 2, p. 149–165, doi: 10.1080/10407788808913609.
- FEFLOW-training-manual, 2016, Training manual: Groundwater modeling with FEFLOW 7.0: DHI-WASY GmbH.

- Fitts, C.R., 2013a, 2 - Physical Properties BT - Groundwater Science (Second Edition), *in* Academic Press, Boston, p. 23–45.
- Fitts, C.R., 2013b, 3 - Principles of Flow BT - Groundwater Science (Second Edition), *in* Academic Press, Boston, p. 47–96.
- Haehnlein, S., Bayer, P., and Blum, P., 2010, International legal status of the use of shallow geothermal energy: Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 14, no. 9, p. 2611–2625, doi: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.069>.
- Hubbert, M.K., 1940, The theory of ground-water motion: The Journal of Geology, v. 48, no. 8, p. 785–944.
- Ingebritsen, S.E., and Sanford, W.E., 1999, Groundwater in geologic processes: Cambridge University Press.
- IX1Dv3-Manual, 2006, IX1D v 3 Tutorial:
- KD2Pro-Manual, 2016, Manual del analizador de propiedades térmicas KD2Pro: , p. 67.
- Kim, C.G., and Lockwood, J.G., 1974, An assessment of topographical controls on the distribution of rainfall in the Central Pennines.: Meteorological Magazine,.
- De la Cruz, R., Suárez, M., Belmar, M., Quiroz, D., and Bell, M., 2003, Area Coihaique-Balmaceda, Región Aisén del General Carlos Ibáñez del Campo: Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago.
- Lowrie, W., 2007, Fundamentals of geophysics: Cambridge University Press, New York.
- Lund, J.W., and Boyd, T.L., 2016, Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review: Geothermics, v. 60, p. 66–93, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.004>.
- Maripanguí, R., MUñoz, M., Aravena, D., García, K., Daniele, L., and Morata, D., 2016, Assessment of geothermal heat pump heating systems in Coyhaique city, Chilean Patagonia, *in* 38th New Zealand Geothermal Workshop, Auckland, New Zealand, p. 8.
- Molina-Giraldo, N., Bayer, P., and Blum, P., 2011, Evaluating the influence of thermal dispersion on temperature plumes from geothermal systems using analytical solutions: International Journal of Thermal Sciences, v. 50, no. 7, p. 1223–1231, doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.02.004>.
- Páez, D., 2011, Investigación Geológica Minera Ambiental en Aysén, Mapa hidro-geología general área Coyhaique - Valle Simpson medio, Región de Aysén.:
- PDA-Coyhaique, 2014, Plan de descontaminación atmosférica para la ciudad de Coyhaique y su zona circundante.:
- Precios-Chile, 2017, Generador de precios de la construcción - Chile:
- RETScreen, 2005, Ground source heat pump project analysis, *in* Clean Energy Project Analysis, Minister of Natural Resources Canada, Canada, p. 69.
- SAESA, 2017, Simulador tarifario Edelaysen. Empresa de generación y distribución de energía eléctrica en la región de Aysén. Grupo SAESA:
- Sarbu, I., and Sebarchievici, C., 2016a, Chapter 5 - Ground-Source Heat Pump Systems BT -

- Ground-Source Heat Pumps, *in* Academic Press, p. 71–128.
- Sarbu, I., and Sebarchievici, C., 2016b, Chapter 6 - Heat Pump Heating and Cooling Systems, *in* Ground-Source Heat Pumps: Fundamentals, Experiments and Applications, Elsevier Ltd., San Diego, USA, p. 37.
- Self, S.J., Reddy, B. V, and Rosen, M.A., 2013, Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options: *Applied Energy*, v. 101, no. 0, p. 341–348, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.048>.
- Signorelli, S., Bassetti, S., Pahud, D., and Kohl, T., 2007, Numerical evaluation of thermal response tests: *Geothermics*, v. 36, no. 2, p. 141–166, doi: <http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2006.10.006>.
- Suárez, M., De la Cruz, R., and Bell, M., 2007, Geología del área Ñeriguao - Bañó Nuevo: Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chile.
- TCS-Software, 2006, Software para el uso del Escáner de Conductividad Térmica (TCS):
- TCS-TD-Manual, 2006, Guía de uso del Escáner de Conductividad Térmica y Difusividad Térmica (TCS-TD):
- TinyPerm-Calibración, 2013, Carata de calibración TinyPerm:
- TinyPerm-Manual, 2013, Guía de uso TinyPerm:
- Trewartha, G.T., 1961, The earth's problem climates: John Wiley & Sons, Ltd, Madison, USA.
- TSC-Manual, 2006, Guía de uso del Escáner de Conductividad Térmica (TCS): , p. 6.
- Turc, L., 1953, Le bilan d'eau des sols: relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement: Université de Paris, 188-202 p.
- US-Department-Of-Energy, 2011, Guide to Geothermal Heat Pumps.:
- WalkTEM-Manual, 2015, Guía para el uso del medidor de Transiente ElectroMagnético ABEM-WalkTEM:
- Waterkotte-DS112500T, 2017, Catálogo bomba de calor geotérmica Waterkotte DS112500T: , p. 3.

## Anexo

Tabla A-14. Perfil de temperatura y conductividad eléctrica en el pozo Juana Sánchez.

Profundidad	Conductividad eléctrica	Temperatura
m	$\mu\text{S/cm}$	$^{\circ}\text{C}$
1,5	365	8,1
2	373	8,2
3	375	8,2
4	375	8,2
5	376	8,1
6	377	8
7	377	8
8	378	7,9
9	358	7,9

Tabla A-15. Perfil de temperatura y conductividad eléctrica en el pozo Carmen.

Profundidad	Conductividad eléctrica	Temperatura
m	$\mu\text{S/cm}$	$^{\circ}\text{C}$
2	377	10,7
2,5	378	10,7

Tabla A-16. Perfil de temperatura y conductividad eléctrica en el pozo Coyhaique Alto.

Profundidad	Conductividad eléctrica	Temperatura
m	$\mu\text{S/cm}$	$^{\circ}\text{C}$
4,5	197	10
5,5	274	10,3
6,5	309	10,3
7,5	331	10,2
8	352	10,2

Tabla A-17. Perfil de temperatura y conductividad eléctrica en el pozo Relleno Sanitario.

Profundidad	Conductividad eléctrica	Temperatura	Profundidad	Conductividad eléctrica	Temperatura
m	μS/cm	°C	m	μS/cm	°C
7,3	445	10,6	34,3	731	10,3
8,3	466	10	35	754	10,5
9,3	474	9,8	35,3	755	10,5
10,3	483	9,7	36,3	770	10,5
11,3	489	9,7	37,3	769	10,6
12,3	491	9,7	38,3	775	10,6
13,3	494	9,7	39,3	781	10,6
14,3	493	9,8	40,3	781	10,7
15,3	497	9,8	41,3	782	10,7
16,3	501	9,8	42,3	785	10,7
17,3	502	9,8	43,3	786	10,8
18,3	502	9,8	44,3	794	10,8
19,3	503	9,8	45,3	796	10,8
20,3	505	9,8	46,3	818	10,9
21,3	506	9,8	47,3	826	10,9
22,3	509	9,9	48,3	831	10,9
23,3	510	9,9	49,3	834	11
24,3	511	9,9	50,3	839	11
25,3	513	9,9	51,3	840	11
26,3	515	10	52,3	841	11,1
27,3	529	10	53,3	845	11,1
28	538	10,1	54,3	848	11,2
28,3	538	10,1	55,3	851	11,2
29	541	10,1	56,3	853	11,2
29,3	547	10,1	57,3	854	11,3
30,3	551	10,2	58,3	858	11,3
31,3	558	10,2	59,3	860	11,3
32,3	571	10,2	60,3	595	11,5
33	577	10,3	61,3	596	11,5
33,3	638	10,3	62,3	598	11,5
34	725	10,3			

Tabla A-18. Perfil de temperatura y conductividad eléctrica en el pozo Club de Leones Coyhaique.

Profundidad	Conductividad eléctrica	Temperatura
m	$\mu\text{S/cm}$	$^{\circ}\text{C}$
3,5	112	10,3
4	114	9,4
5	115	9,1

Tabla A-19. Detalle de las mediciones de propiedades hidráulicas de las rocas que constituyen el basamento rocoso en la ciudad de Coyhaique.

Muestra de roca	Valor Tiny perm	Permeabilidad	Permeabilidad	Conductividad hidráulica	Permeabilidad
		mD	m <sup>2</sup>	m/s	
CoyKat_4	13,16	0,45	4,42E-16	3,31E-09	impermeable
CoyKat_4	13,02	0,66	6,55E-16	4,90E-09	impermeable
CoyKat_4	12,17	7,20	7,11E-15	5,33E-08	impermeable
CoyKat_4	11,92	14,53	1,43E-14	1,07E-07	impermeable
CoyKat_4	11,83	18,70	1,85E-14	1,38E-07	impermeable
CoyKat_4	12,50	2,85	2,82E-15	2,11E-08	impermeable
CoyKat_4	12,39	3,89	3,83E-15	2,87E-08	impermeable
CoyKat_4	12,29	5,14	5,08E-15	3,80E-08	impermeable
CoyKat_4	12,24	5,92	5,84E-15	4,38E-08	impermeable
CoyKat_4	11,97	12,63	1,25E-14	9,34E-08	impermeable
CoyKat_4	11,87	16,72	1,65E-14	1,24E-07	impermeable
CoyKat_4	11,10	145,03	1,43E-13	1,07E-06	semipermeable
CoyKat_4	11,04	171,63	1,69E-13	1,27E-06	semipermeable
CoyKat_4	10,84	300,82	2,97E-13	2,22E-06	semipermeable
CoyKat_4	10,68	471,29	4,65E-13	3,48E-06	semipermeable
CoyKat_6	11,07	157,77	1,56E-13	1,17E-06	semipermeable
CoyKat_6	10,48	826,06	8,15E-13	6,11E-06	semipermeable
CoyKat_6	10,38	1093,64	1,08E-12	8,09E-06	semipermeable
CoyKat_6	10,31	1331,00	1,31E-12	9,84E-06	semipermeable
CoyKat_6	10,06	2684,31	2,65E-12	1,98E-05	semipermeable
CoyKat_12	11,49	48,55	4,79E-14	3,59E-07	impermeable
CoyKat_12	11,42	59,09	5,83E-14	4,37E-07	impermeable
CoyKat_12	11,27	90,01	8,88E-14	6,66E-07	impermeable
CoyKat_12	11,24	97,92	9,66E-14	7,24E-07	impermeable
CoyKat_12	11,23	100,70	9,94E-14	7,45E-07	impermeable
CoyKat_12	11,05	166,88	1,65E-13	1,23E-06	semipermeable
CoyKat_12	10,93	233,69	2,31E-13	1,73E-06	semipermeable
CoyKat_12	10,88	268,88	2,65E-13	1,99E-06	semipermeable
CoyKat_12	10,62	557,71	5,50E-13	4,12E-06	semipermeable
CoyKat_12	10,48	826,06	8,15E-13	6,11E-06	semipermeable
Kspa_1	12,50	2,85	2,82E-15	2,11E-08	impermeable
Kspa_1	10,05	2760,70	2,72E-12	2,04E-05	semipermeable
Ohb_1	11,18	115,87	1,14E-13	8,57E-07	impermeable



Ohb_1	9,73	6776,06	6,69E-12	5,01E-05	semipermeable
Ogb_1	10,62	557,71	5,50E-13	4,12E-06	semipermeable
Ogb_1	9,97	3455,48	3,41E-12	2,56E-05	semipermeable

Tabla A-20. Detalle de las mediciones de propiedades térmicas de las rocas que constituyen el basamento rocoso en la ciudad de Coyhaique.

Muestra	Densidad	Conductividad térmica	Difusividad térmica	Capacidad calórica
	kg/m <sup>3</sup>	W/m/K	mm <sup>2</sup> /s	J/Jg·K
CoyKat_1	2,13	3,01	1,40	1014,02
CoyKat_1	2,13	3,11	1,40	1041,44
CoyKat_1	2,13	3,07	1,37	1051,89
CoyKat_4	2,13	3,73	1,86	940,48
CoyKat_4	2,13	3,80	1,93	923,64
CoyKat_4	2,13	3,73	1,90	920,43
CoyKat_4	2,13	3,50		
CoyKat_4	2,13	3,52		
CoyKat_4	2,13	3,55		
CoyKat_4	2,13	3,65		
CoyKat_4	2,13	3,54		
CoyKat_4	2,13	3,45		
CoyKat_4	2,13	3,99		
CoyKat_4	2,13	4,14		
CoyKat_4	2,13	3,41		
CoyKat_4	2,13	3,85		
CoyKat_6	2,13	3,19	1,50	995,16
CoyKat_6	2,13	3,15	1,46	1010,26
CoyKat_6	2,13	3,09	1,39	1046,76
CoyKat_12	2,13	2,35	1,08	1024,33
CoyKat_12	2,13	2,37	1,08	1034,43
CoyKat_12	2,13	2,36	1,06	1050,11
CoyKat_14	2,13	2,28	1,08	997,05
CoyKat_14	2,13	2,35	1,07	1034,54
CoyKat_14	2,13	2,32	1,07	1016,85
Kspa_1	2,5	2,17	1,08	805,20
Kspa_1	2,5	2,15	1,07	800,74

Kspa_2	2,5	2,39	1,17	816,37
Kspa_2	2,5	2,39	1,16	822,03
Ohb_1	2,68	2,27	1,08	785,07
Ohb_1	2,68	2,27	1,06	796,07
Ogb_1	2,56	1,98	0,94	820,15
Ogb_1	2,56	2,00	0,95	822,33

Tabla A-21. Detalle cargas térmicas edificio del Gobierno Regional de Aysén.

Intervalo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temp.	Ener	Ener	Ener	Ener	Ener	Ener	Ener	Ener	Ener	Ener	Ener	Ener
°C	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
<-3	0	0	0	-243	-243	-765	-1269	-452	-122	0	0	0
-3 - -2	0	0	-17	-152	-287	-371	-708	-253	-219	-17	-17	0
-2 - -1	0	0	-16	-174	-475	-681	-776	-475	-254	-95	0	0
-1 - 0	0	0	-44	-311	-178	-934	-1838	-637	-341	-74	-30	0
0 - 1	0	0	-116	-155	-478	-802	-1784	-1409	-440	-155	-13	0
1 - 2	0	0	-131	-251	-536	-951	-1465	-1170	-459	-120	-55	0
2 - 3	-10	-29	-97	-427	-902	-1280	-1775	-1251	-1057	-301	-87	0
3 - 4	0	-17	-152	-457	-1134	-1532	-1719	-1532	-830	-440	-152	-34
4 - 5	-51	-50	-137	-448	-1078	-1367	-1642	-1707	-1049	-535	-297	-51
5 - 6	-48	-54	-258	-738	-1152	-1272	-1152	-1368	-1026	-642	-240	-90
6 - 7	-76	-76	-181	-534	-1048	-953	-734	-1110	-853	-553	-262	-95
7 - 8	-117	-94	-261	-505	-837	-703	-385	-568	-629	-427	-325	-120
8 - 9	-85	-82	-241	-345	-485	-331	-175	-266	-397	-381	-244	-138
9 - 10	-130	-198	-306	-389	-436	-262	-187	-262	-431	-446	-366	-247
10 - 11	-217	-283	-434	-460	-377	-177	-123	-163	-394	-514	-492	-394
11 - 12	-136	-218	-242	-216	-137	-62	-25	-54	-160	-276	-345	-308
12 - 13	-26	-29	-31	-25	-10	-3	-3	-6	-14	-31	-37	-35
13 - 14	164	176	222	133	22	2	6	18	65	150	193	256
14 - 15	371	376	382	271	10	3	5	23	77	230	338	578
15 - 16	629	532	473	297	8	0	8	0	56	273	425	737
16 - 17	754	623	541	246	11	0	0	0	82	268	426	699
17 - 18	952	757	785	222	0	0	0	0	42	354	445	688
18 - 19	1176	696	533	203	0	0	0	0	59	262	237	837
19 - 20	1080	793	390	240	0	0	0	0	30	170	380	590
20 - 21	1017	642	566	116	0	0	0	0	0	231	301	358
21 - 22	822	789	639	78	0	0	0	0	0	157	365	222
22 - 23	868	530	419	72	0	0	0	0	0	14	130	217
23 - 24	731	410	366	32	0	0	0	0	0	0	175	207
24 - 25	851	396	208	0	0	0	0	0	0	0	156	139
> 25	2570	1830	163	0	0	0	0	0	0	0	217	271

Tabla A-22. Valor traslado de equipo de perforación del sondeo geotérmico por día.

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio	Total
<b>1. Maquinaria</b>				
día	Transporte, puesta en obra y retirada de equipo mecánico para la perforación del terreno, colocación de las sondas geotérmicas y posterior inyección de mortero.	1	\$594.105	\$594.105
			<b>Subtotal maquinaria:</b>	<b>\$594.105</b>
<b>2. Herramientas</b>				
	Herramientas	2	\$11.941	<b>\$23.882</b>
			<b>Costos directos (1+2):</b>	<b>\$617.987</b>

Tabla A-23. Valor de perforación del sondeo geotérmico por metro.

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio	Total
<b>1. Maquinaria</b>				
h	Equipo hidráulico, con doble cabezal, para la perforación del terreno en sondeos geotérmicos, con sistema para prevenir la evacuación del detritus de perforación, complementado con equipo compacto de bomba y desarenador para la circulación del fluido de perforación.	1	\$76.559	\$76.559
h	Equipo de inyección para sondeos geotérmicos.	1	\$24.709	\$24.709
			<b>Subtotal maquinaria:</b>	<b>\$101.268</b>
<b>2. Mano de obra</b>				
h	Maestro construcción de obra civil.	1	\$7.235	\$7.235
h	Ayudante construcción de obra civil.	1	\$5.327	\$5.327
			<b>Subtotal mano de obra:</b>	<b>\$12.562</b>
<b>3. Herramientas</b>				
	Herramientas	1	\$1.138	<b>\$2.267</b>
			<b>Costos directos (1+2+3):</b>	<b>\$116.106</b>

Tabla A-24. Sonda doble e instalación.

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio	Total
<b>1. Materiales</b>				
Ud	Sonda geotérmica para instalación vertical, de 100 m de longitud y 96 mm de diámetro, formada por dos sondas.	1	\$583.131	\$583.131
m	Tubo de inyección, de polietileno de alta densidad (PEAD/HDPE), para relleno de sonda geotérmica vertical.	102	\$808	\$82.416
Ud	Conjunto de dos piezas, para unión de la sonda geotérmica vertical doble al colector.	1	\$33.170	\$33.170
Ud	Distanciador para tubos, 4x32 mm.	14	\$4.170	\$58.380
kg	Mortero preparado de bentonita.	1800	\$389	\$700.200
<b>Subtotal material:</b>				<b>\$1.457.297</b>
<b>2. Mano de obra</b>				
h	Técnico energías renovables.	3	\$4.986	\$13.841
h	Ayudante técnico.	3	\$3.545	\$9.841
<b>Subtotal mano de obra:</b>				<b>\$23.682</b>
<b>3. Herramientas</b>				
	Herramientas	2,000	\$14.809	\$29.618
<b>Costos directos (1+2+3):</b>				<b>\$1.510.597</b>

Tabla A-25. Costo bomba de calor agua-agua.

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Total
<b>1. Materiales</b>				
Ud	Unidad agua-agua bomba de calor de producción simultánea de agua fría y de agua caliente, potencia frigorífica nominal de 85,8 kW y potencia calorífica nominal de 120,6 kW, (temperatura de salida del agua fría: 7°C, salto térmico: 5°C, y temperatura de salida del agua caliente: 50°C), caudal de agua nominal de 14,8 m³/h, caudal de aire nominal de 32000 m³/h y potencia sonora de 71,5 dBA.	1	\$23.708.241	\$23.708.241
Ud	Filtro retenedor de residuos de latón, para una presión máxima de trabajo de 16 bar y una temperatura máxima de 110°C.	2	\$36.623	\$73.246
Ud	Manguito anti-vibración, de goma, para una presión máxima de trabajo de 10 bar.	4	\$23.510	\$94.040
Ud	Manómetro con baño de glicerina y diámetro de esfera de 100 mm, con toma vertical, para montaje roscado de 1/2", escala de presión de 0 a 5 bar.	4	\$9.933	\$39.732
Ud	Purgador automático de aire con boya y rosca de 1/2" de diámetro, para una presión máxima de trabajo de 6 bar y una temperatura máxima de 110°C.	2	\$4.506	\$9.012
Ud	Termómetro bimetalico, escala de temperatura de 0 a 120°C.	4	\$18.963	\$75.852
Ud	Válvula de seguridad, con rosca de 3/4" de diámetro, tarada a 4 bar de presión.	2	\$5.530	\$11.060
<b>Subtotal material:</b>				<b>\$24.011.183</b>
<b>2. Mano de obra</b>				
h	Maestro 1ª instalador de climatización.	20	\$4.985	\$99.700
h	Ayudante instalador de climatización.	20	\$3.544	\$70.880
<b>Subtotal mano de obra:</b>				<b>\$170.580</b>
<b>3. Herramientas</b>				
	Herramientas	2	\$241.800	\$483.600
<b>Costos directos (1+2+3):</b>				<b>\$24.665.363</b>
<b>Costo de mantenimiento anual: \$ 1.578.473 anual en los primeros 10 años.</b>				

Tabla A-26. Costo bomba de calor aire-agua.

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio	Total
<b>1. Materiales</b>				
Ud	Bomba de calor reversible, aire-agua, potencia frigorífica nominal de 94,9 kW (temperatura de entrada del aire: 35°C; temperatura de salida del agua: 7°C, salto térmico: 5°C), potencia calorífica nominal de 99,7 kW (temperatura húmeda de entrada del aire: 6°C; temperatura de salida del agua: 45°C), con grupo hidráulico (vaso de expansión de 35 l, presión nominal disponible de 153 kPa) y depósito de inercia de 275 l, caudal de agua nominal de 16,4 m³/h, caudal de aire nominal de 37000 m³/h y potencia sonora de 92 dBA.	1	\$23.806.676	\$23.806.676
Ud	Manguito antivibración, de goma, para una presión máxima de trabajo de 10 bar.	2	\$23.510	\$47.020
<b>Subtotal material:</b>				<b>\$23.853.696</b>
<b>2. Mano de obra</b>				
h	Maestro 1ª instalador de climatización.	20	\$4.985	\$99.700
h	Ayudante instalador de climatización.	20	\$3.544	\$70.880
<b>Subtotal mano de obra:</b>				<b>\$170.580</b>
<b>3. Herramientas</b>				
	Herramientas	2		\$480.574
<b>Costos directos (1+2+3):</b>				<b>\$24.504.850</b>
<b>Costo de mantenimiento anual: \$ 1.568.591 anual en los primeros 10 años.</b>				