

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Formulación del proyecto	1
1.2 Objetivos.....	6
1.2.1 Objetivo general.....	6
1.2.2 Objetivos específicos.....	6
1.3 Área de estudio	6
1.3.1 Ubicación, vías de acceso y clima	6
1.4 Estudios previos.....	8
1.5 Hipótesis de trabajo	9
2. ANTECEDENTES.....	10
2.1 Bombas de calor geotérmicas	10
2.2 Tipologías	12
2.3 Plan regulador comunal	13
2.4 Costos.....	15
2.4.1 Costo de instalación.....	15
2.5 Aspectos legales.....	16
2.5.1 Sistema vertical abierto.....	16
2.5.2 Comentarios.....	16
3. METODOLOGÍA.....	20
3.1 Base de datos	20
3.2 Temperatura del subsuelo.....	20
3.3 Coeficiente de rendimiento.....	21
3.4 Zonificación.....	22
3.5 Bombas de calor tipo GWHP.....	23

3.6 Bombas de calor tipo BHP.....	26
4. MARCO HIDROGEOLÓGICO.....	28
4.1 Geología Regional	28
4.1.1 Basamento impermeable.....	28
4.1.2 Rocas estratificadas.....	28
4.1.3 Depósitos semiconsolidados	30
4.1.4 Depósitos no consolidados.....	30
4.2 Recursos de agua subterránea	31
5. RESULTADOS	33
5.1 Intercambiadores horizontales	33
5.1.1 Temperatura del subsuelo	33
5.1.2 Estimación del COP.....	33
5.1.3 Limitantes espaciales	35
5.2 Intercambiadores verticales abiertos.....	38
5.2.1 Profundidad del agua subterránea.....	38
5.2.2 Espesor del acuífero.....	41
5.2.3 Estimación del COP.....	43
5.2.4 Estimación del potencial.....	44
5.2.5 Profundidad a perforar	45
5.3 Intercambiadores verticales cerrados.....	46
5.3.1 Tasa de extracción de calor.....	46
5.3.2 Profundidad a perforar	49
5.4 Comparativa de costos	51
5.4.1 Costos de instalación	51
5.4.2 Costo de operación.....	52
6. DISCUSIONES	53

6.1 Sistema horizontal cerrado.....	53
6.2 Sistema vertical abierto.....	53
6.2.1 Zonas muy favorables.....	55
6.3 Sistema vertical cerrado.....	57
7. CONCLUSIONES.....	58
8. SUGERENCIAS.....	59
9. BIBLIOGRAFÍA.....	60
10. ANEXOS.....	64
10.1 Niveles estáticos y piezométricos.....	64
10.2 Temperatura de agua subterránea.....	68
10.2.1 Temperatura estabilizada.....	68
10.2.2 Perfiles de temperatura en profundidad.....	69
10.3 Abatimiento en pozos con caudales de explotación < 10 l/s.	74
10.4 Estratigrafía.....	75
10.5 Atributos del Plan Regulador Comunal.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Usos directo de la energía geotérmica, capacidad instalada y energía utilizada en el período 1995-2015. Extraído de Lund & Boyd (2016).....	1
Figura 1.2. Usos directos de la energía geotérmica de los últimos 20 años. Tomado de Lund y Boyd, (2016).....	2
Figura 1.3. Humedad relativa del ambiente. Elaboración propia a partir de datos de Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA).	3
Figura 1.4. Fuentes contaminantes de material particulado MP 2,5 (Ministerio del Medio Ambiente, 2015).	4
Figura 1.5. Concentración de material particulado MP 10 y MP 2,5. Elaboración propia a partir de datos de Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA).	5
Figura 1.6 Ubicación y vías de acceso a la ciudad de Temuco. La zona de estudio se encuentra dentro del rectángulo azul. Modificado de Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, 2016.....	7
Figura 1.7. Gráfica de temperaturas medias mensuales en el período 1970-2015. Elaboración propia a partir de datos de Estadística Climatológica Tomo II (2001) y Anuarios climatológicos 2000-2015.	8
Figura 2.1. Comparativa de temperatura en: ambiente, suelo y agua subterránea (izquierda). Perfil de temperatura en profundidad para invierno y verano en suelos húmedos y secos (derecha). Extraído de RETScreen (2005).....	10
Figura 2.2.Ciclo de una bomba de calor. Extraído de Aiguasol, (2016).	11
Figura 2.3 Intercambiadores acoplados a una bomba de calor. Imagen adaptada de material inédito del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA). http://www.cega.ing.uchile.cl/	12
Figura 2.4. Coeficiente de ocupación máxima del Plan Regulador Comunal de la ciudad de Temuco. Modificado de archivo proporcionado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), 2010 y posteriores enmiendas. Gobierno de Chile.....	14
Figura 2.5. Procesos para la solicitud de un derecho de aprovechamiento de aguas subterráneas. Tomado de Dirección General de Aguas (2017).	18
Figura 2.6. Fases para la constitución de un derecho de aprovechamiento de aguas subterráneas. Extraído de Vielma (2013)	19
Figura 4.1 Mapa geológico del área de estudio. Adaptado de Mella y Quiroz, (2010).....	29

Figura 4.2 Mapa hidrogeológico del área de Temuco. (Adaptado de Troncoso et al., 2007).	32
Figura 5.1. Temperatura a 0,8m, 1,5m y 3m de profundidad en la Estación Carillanca durante el año 2015.....	33
Figura 5.2 Coeficiente de rendimiento para calefacción calculado a partir de la temperatura a 0,8 m, 1,5 m y 3 m, de profundidad.....	34
Figura 5.3 Categorías espaciales definidas para la implementación de sistemas de calefacción por bombas de calor geotérmicas.	37
Figura 5.4. Modelo Geoestadístico de interpolación basado en kriging para el nivel estático.	39
Figura 5.5 Modelo geoestadístico de interpolación basado en kriging para la cota hidráulica. Las flechas indican la dirección del flujo de aguas subterráneas. Elaboración propia.	40
Figura 5.6 Traza en planta de los perfiles A-A' y B-B'-B''. Los círculos representan la ubicación de las captaciones con su respectivo código.	41
Figura 5.7 Perfiles geológicos y estratigráficos. (a) Transversal al Río Cautín [A-A']; (b): longitudinal al río [B-B'-B''].	42
Figura 5.8 Temperatura de captaciones puntuales de agua subterránea en la ciudad de Temuco. Elaboración propia.....	43
Figura 5.9. Gráfica caudales otorgados por la DGA para las comunas de Temuco y PLC. Elaboración propia a partir de datos de DGA (2017).	44
Figura 5.10. Profundidad a perforar para la instalación de GWHP.	46
Figura 5.11. Extracción de calor en profundidad (sHE). Caso flujo normal de aguas subterráneas (a) y (b), caso alto flujo de aguas subterráneas. Elaboración propia.	48
Figura 5.12. Profundidad a perforar para sistemas BHP. (a) caso flujo normal de aguas subterráneas y (b) caso alto flujo de aguas subterráneas. Aplicado a la tipología 5. Elaboración propia.	50
Figura 6.1. Mapa de transmisividad. Mapa base hidrogeológica de Troncoso et al. (2007).	54
Figura 6.2. Zonas muy favorables para GWHP.....	56
Figura 10.1. Superficie predial mínima en la ciudad de Temuco. Elaboración propia.	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Capacidad instalada (MWt) y energía utilizada (TJ/año) de los cinco países líderes en el uso de bombas de calor. Adaptada de Lund & Boyd, (2016).	2
Tabla 2.1. Tipologías consideradas para el estudio. (UNTEC 2014).	12
Tabla 2.2. Cantidad de viviendas por tipología y período	13
Tabla 2.3. Precios de los principales ítems para la instalación de sistemas de bombas de calor geotérmicas. Elaboración propia.	15
Tabla 3.1. Horas/grado en horario de calefacción para el período 2010-2016.	23
Tabla 3.2. Extracción de energía máxima por superficie para distintos suelos. VDI 4640, 2001.	23
Tabla 3.3. Valores típicos de extracción de calor en litologías. Modificado de Ondreka et al. (2007).....	26
Tabla 5.1. Área requerida por los intercambiadores horizontales para cada tipología.	35
Tabla 5.2. Categorías espaciales y su favorabilidad para sistemas geotérmicos horizontales cerrados.....	36
Tabla 5.3. Coeficiente de rendimiento para sistemas GWHP.....	44
Tabla 5.4 Potencia entregada por el agua subterránea en función del caudal extraído, para distintos percentiles de derechos otorgados por la DGA.....	45
Tabla 5.5. Tasa de extracción de calor (sHE) para los pozos con información estratigráfica.	47
Tabla 5.6. Profundidad a perforar para los sistemas verticales cerrados (BHP).	49
Tabla 5.7. Costos de instalación para los tres sistemas de intercambio de calor estudiados (dimensión similar).....	51
Tabla 5.8. Costos operacionales de los sistemas con bombas de calor geotérmicas.	52