



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

CUANTIFICACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE BAJA TEMPERATURA,
MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS PARA CALEFACCIÓN
EN LA CIUDAD DE TALCA.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

JAIME ALEJANDRO SCHORR RUBIO

PROFESORA GUÍA:

DOLORINDA DANIELE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

DIEGO MORATA CÉSPEDES

MAURICIO MUÑOZ MORALES

Este trabajo ha sido financiado por el Centro de Excelencia en Geotermia de Los
Andes, CEGA.

SANTIAGO DE CHILE

2017

RESUMEN DE LA MEMORIA DE TÍTULO
PARA OPTAR AL GRADO DE: Geólogo

POR: Jaime Alejandro Schorr Rubio

FECHA: 30 de junio de 2017

PROFESORA GUÍA: Dolorinda Daniele

CUANTIFICACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE BAJA TEMPERATURA, MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS PARA CALEFACCIÓN EN LA CIUDAD DE TALCA.

La ciudad de Talca se encuentra en la Depresión Central de Chile, en los 35°S, aproximadamente, en el flanco oriental de la Cordillera de la Costa. Al igual que otras ciudades ubicadas en longitudes similares, se encuentra altamente contaminada en invierno por material particulado del tipo PM 2.5 y PM 10, lo cual podría verse mitigado en gran medida por el uso de calefactores *cero-emisión* de alta eficiencia eléctrica, como lo son las bombas de calor geotérmicas.

El acuífero bajo la ciudad ofrece un gran potencial para su implementación, ya que se trata, mayoritariamente, de gravas y arenas pertenecientes al abanico aluvial del Río Maule y Río Lircay con una potencia respetable, de hasta 500 metros en algunos sectores. La profundidad del nivel estático fluctúa entre los 1.6 y 47 metros, con espesores saturados entre 15 y 83 metros y un flujo preponderante hacia el W-NW. Un 90% de los derechos de aguas otorgados por la DGA extraen al menos 6 l/s y las transmisividades alcanzan valores de hasta 7300 m²/día. Las temperaturas de las aguas subterráneas, por otra parte, fluctúan entre 15.8 y 19.2 °C, las que permiten estimar un COP entre 6.4 y 7.4 para sistemas verticales abiertos. En el caso de los sistemas verticales cerrados, existen zonas de menor y mayor favorabilidad, obteniéndose valores de sHE entre los 43 y 86 W/m, donde los más altos representan altos flujos subterráneos controlados principalmente por una mayor conductividad hidráulica de los sedimentos y alto gradiente. Por último, en el caso de los sistemas horizontales cerrados, y mediante una estimación de la temperatura del subsuelo a 1.5 metros de profundidad, usando una ecuación armónica simple y una difusividad térmica de 0.04817 m²/día, el valor del COP fluctúa entre 3.5 y 4.7, con un valor promedio anual de 4.1. Un análisis de sensibilidad arroja una variación máxima de 7.7% con respecto a la profundidad.

Usando demandas variables en base a una zonificación hecha con información disponible de demandas térmicas, se concluye que un nivel estático profundo propicia el uso de sistemas verticales cerrados y/o horizontales cerrados, sin embargo, con demandas por sobre los 3 kW, es preferible en casi cualquier caso el uso de un sistema vertical abierto, dado lo somero del acuífero en la ciudad y los parámetros hidráulicos que este presenta. En la zona poniente del Río Claro, y dado

que el espesor sedimentario disminuye por la Cordillera de la Costa, se recomienda instalar sistemas horizontales cerrados.

A mi familia

Agradecimientos

Quiero agradecer primero que todo al Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes, que mediante el proyecto FONDAP N° 15090013, me permitió realizar esta memoria de título. A los Doctores Linda Daniele y Diego Morata Céspedes por su buena disposición al momento de corregir y hacer sugerencias sobre esta memoria. Al Departamento de Geología, por permitir que me desarrollara como profesional. Especialmente, agradecer a Mauricio Muñoz que, a pesar de estar ocupado con su magíster, siempre se dio el tiempo para reunirse con nosotros y ayudarnos a delinear la memoria, darnos su opinión, correcciones, tomarse un café y tirar unas tallas. A Bruno también, por orientarme con ciertas cosas relativas a la termodinámica. Agradecer además a José Suárez, ingeniero del Hospital de Talca por recibirnos, mostrarnos las instalaciones y su buena disposición.

Gracias a mi familia, porque son el apoyo más importante en mi vida. Sin ellos no habría logrado pasar estos 8 largos años que tomó salir de la universidad. Mis padres y hermanos: papá, mamá, Fernanda, Seba y Pipe. A mis abuelos, Keka, Valy y Opapa que siempre estuvieron orgullosos de mí y me dieron ánimos para seguir y buenos consejos.

A todos esos amigos que siempre me apoyaron: el Tomi, por esas noches de recuerdos, chelas y guitarreos, al Barrios, al Gary, la Mane, el Lucho, el Juan, a los memoristas fracasados, Mila y Callo. Al Walter con la Cami, por ser los roomates más piolas de la vida. A los cabros de la salita de memoristas, por esas tallas y conversas sacadoras de vuelta, sin ellos todo habría sido mucho más fome.

Gracias especiales a los Möller Solís: Sven, Yust, Alen, Anita, Pollo y la Jose, por hacerme parte de su familia durante un año y recibirme como si fuera uno más. Les estaré eternamente agradecidos.

A los Gabros, que puta que los quiero, son el tremendo curso y los mejores. Rubén, Nachetes, Carlangas, Cata, Toppísimo, Edu, Chili, Lauris, Ali, Tami, Lemuelóceras, Marce, los Victors, Deivid y todos los que me faltan: fueron los mejores años de U gracias a las chelas, los terrenos y los carretes que nos mandamos.

A la Nacha, porque siempre me motivó a seguir adelante y a seguir trabajando cuando las cosas no salían tan bien.

A todos aquellos que estuvieron, que me apoyaron con esas largas noches de estudio, de frustración y me volvieron a motivar para recoger los apuntes y seguir estudiando. A los que están hoy, que me motivan a seguir creciendo, aprendiendo y poniéndome nuevas metas y sacan lo mejor de mí.

Tabla de contenido

Resumen.....	i
1. Introducción.....	14
1.1 Formulación del estudio propuesto.....	14
1.2 Objetivos.....	15
1.2.1 Objetivos principales.....	15
1.2.2 Objetivos específicos.....	15
1.3 Metodología.....	16
1.3.1 Creación de una base de datos.....	16
1.3.2 Hidrogeología.....	16
1.3.3 Estratigrafía.....	16
1.3.4 Coeficientes de rendimiento.....	16
1.3.5 Demandas térmicas y potencia extraíble.....	17
1.3.6 SIG.....	17
1.4 Antecedentes.....	18
1.4.1 Bomba de calor geotérmica.....	18
1.4.1.1 Dimensionamiento del sistema.....	19
1.4.2 Tipos de intercambiadores de calor.....	19
1.4.2.1 Sistemas abiertos (GWHE).....	20
1.4.2.2 Sistemas cerrados.....	20
1.4.3 Legales.....	21
1.4.3.1 Sistemas verticales abiertos.....	21
1.4.3.2 Sistemas verticales y horizontales cerrados.....	22
1.5 Clima.....	23
1.5.1 Estación “Talca U.C.”.....	23

1.5.2 Estación “Río Claro en Rauquén”	24
1.6 Variaciones estacionales del nivel estático	25
1.7 Estudios similares	26
1.8 Aplicaciones de la geotermia de baja temperatura en Chile	27
1.9 Hipótesis de trabajo	28
2. Marco geológico	29
2.1 Segmentación morfológica e hidrografía	29
2.2 Geología	29
2.2.1 Basamento impermeable: Fm. Veta Negra	29
2.2.2 Gravimetría del valle central.....	31
2.2.3 Hidrogeología del relleno sedimentario cuaternario	33
2.2.3.1 Depósitos cineríticos.....	33
2.2.3.2 Abanico del Río Maule.....	34
2.2.3.3 Depósitos fluviales.....	34
2.2.3.4 Depósitos fluviales en cauces actuales	34
2.2.3.5 Depósitos fluviales antiguos del Río Maule	35
3. Resultados	36
3.1 Hidrogeología	36
3.1.1 Niveles estáticos	36
3.1.2 Cotas hidráulicas.....	37
3.2 Estratigrafía	38
3.3 Oferta térmica	40
3.3.1 Coefficient of performance (COP)	40
3.3.2 Intercambiadores horizontales cerrados	41
3.3.2.1 Análisis de sensibilidad.....	44

3.3.3 Intercambiadores verticales abiertos.....	45
3.3.3.1 Temperatura de las aguas subterráneas	46
3.3.3.2 Capacidad de extracción	48
3.3.4 Intercambiadores verticales cerrados.....	54
3.3.4.1 Flujo subterráneo.....	55
3.3.4.2 Potencial geotérmico	56
3.4 Sistemas de información geográfica	57
3.4.1 Plan regulador	57
3.4.1.1 Categorías urbanas	59
3.4.1.2 Demandas unitarias	63
3.4.2 Solución geotérmica de baja temperatura.....	64
3.4.2.1 Sistema vertical abierto	64
3.4.2.2 Sistema vertical cerrado	67
3.4.2.3 Sistema horizontal cerrado	70
4. Discusión.....	72
5. Recomendaciones.....	76
6. Conclusiones.....	77
7. Bibliografía	78
8. Anexos	82
8.1 Zonas urbanas definidas por el plan regulador (PRC) de Talca	82
8.2 Información de pozos.....	83
8.2.1 Niveles estáticos	83
8.2.2 Variaciones estacionales.....	86
8.2.3 Abatimiento	87
8.2.4 Estratigrafía.....	89

8.2.4.1 Perfil E – W.....	89
8.2.4.2 Perfil N – S.....	91
8.3 Temperaturas medias mensuales en Talca	92
8.3.1 Estación “Talca U.C.”	92
8.3.2 Estación “Río Claro en Rauquén”	93
8.4 Temperatura estabilizada del agua subterránea.....	93
8.5 Gradientes hidráulicos	95
8.6 Tipologías de vivienda propuestas por UNTEC (2014).....	96
8.6.1 Dimensionamiento.....	96
8.6.2 Materialidad.....	97

Índice de figuras

Figura 1: Porcentaje de hogares en Talca que utilizan leña por mes. FUENTE: Elaboración propia con datos de Ministerio del Medio Ambiente, 2013.	14
Figura 2: Ciclo de funcionamiento de una bomba de calor en modo calefacción. Cordis (2016).....	18
Figura 3: Variación de la temperatura con respecto a la profundidad en verano (Aug-05) y en invierno (Jan-05). FUENTE: Florides & Kalogirou (2007).....	19
Figura 4: Groundwater heat exchanger. Las flechas indican la dirección de flujo de las aguas subterráneas. FUENTE: Modificado de Florides & Kalogirou (2007). ...	20
Figura 5: Intercambiadores de calor cerrados. FUENTE: Florides & Kalogirou (2007).	21
Figura 6: Estado de protección de los recursos de agua subterránea en la zona de estudio. Se observa que no existe restricción ni prohibición en Talca. FUENTE: DGA (2017).....	22
Figura 7: Temperaturas medias anuales para la ciudad de Talca en un período de 30 años. FUENTE: DGA (estación "Talca U.C.").	23
Figura 8: Temperatura media mensual de los últimos 30 años en Talca. FUENTE: DGA (estación "Talca U.C.").	24
Figura 9: Temperaturas medias mensuales para las estaciones "Talca U.C." y "Río Claro en Rauquén". Período de tiempo entre 1985 y 1993. FUENTE: DGA.	24
Figura 10: Fluctuaciones anuales para 2 estaciones del observatorio de la DGA. Notar que el eje vertical se encuentra invertido. FUENTE: Elaboración propia con información oficial hidrometeorológica y de calidad de aguas, DGA.	26
Figura 11: Detalle de la geología de la zona, propuesta por Morales (2014). Se presenta, además, la hidrografía superficial.....	30
Figura 12: Perfiles gravimétricos en la zona de estudio. FUENTE: Recopilación de GCF Ingenieros Ltda. 2010, Quiroz 2014 y elaboración propia (estratigráficos: N-S y E-W).	31
Figura 13: Perfiles gravimétricos de norte a sur del relleno sedimentario de la cuenca de Talca. FUENTE: Modificado y compilado de Quiroz (2014): L1, L8 y L9 y GCF Ingenieros Ltda. (2010): SIT L5.....	32
Figura 14: Unidades hidrogeológicas de la zona de estudio. Los colores indican la importancia hidrogeológica relativa, desde el celeste, verde a rojo con alta, media y baja, respectivamente. FUENTE: Detalle de Hauser (1995).	33

Figura 15: Distribución de niveles estáticos bajo la ciudad de Talca. FUENTE: Elaboración propia.	37
Figura 16: Cotas hidráulicas en la zona circundante a Talca. Se observan además los puntos de control utilizados en este estudio y las direcciones de flujo subterráneo, perpendiculares a las isopiezas. FUENTE: Elaboración propia.	38
Figura 17: Perfiles estratigráficos de la zona de estudio. Ubicación en Figura 12. FUENTE: Elaboración propia	39
Figura 18: Variación de la eficiencia de Carnot en función de la diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida del evaporador.	41
Figura 19: Evolución de la temperatura del suelo. Los colores indican las distribuciones de temperatura para diferentes días a lo largo del año. FUENTE: ATECYR, 2012.....	42
Figura 20: Fluctuación estimada de la temperatura en el subsuelo a 1.5 metros de profundidad en el año 2015. FUENTE: Elaboración propia.....	43
Figura 21: COP real anual estimado para el relleno sedimentario de la ciudad de Talca. FUENTE: Elaboración propia.	43
Figura 22: Análisis de sensibilidad de la estimación de la temperatura con respecto a la profundidad. Se observa una estabilización progresiva de la temperatura conforme aumenta la profundidad. FUENTE: Elaboración propia.....	44
Figura 23: Variabilidad del COP según la profundidad para el día medido más frío del año. FUENTE: Elaboración propia.	45
Figura 24: Análisis de sensibilidad de la variación del COP con respecto a los días del año y a la profundidad. FUENTE: Elaboración propia.	45
Figura 25: Perfil de temperatura de un pozo ubicado en el Hospital de Talca. El nivel estático se encuentra a 3 metros de profundidad. FUENTE: Muñoz (2016).	46
Figura 26: Temperatura del agua subterránea interpolada usando kriging ordinario omnidireccional con anisotropía. FUENTE: Elaboración propia.	47
Figura 27: COP de la bomba de calor en un sistema vertical abierto. Los valores fluctúan entre 6.4 y 7.4 usando un factor de aproximación de 0.5 y un ΔT de 2 [°C]. FUENTE: Elaboración propia.	48
Figura 28: Valores de transmisividad obtenidos de pruebas de bombeo y de GCF Ingenieros (2010). FUENTE: Elaboración propia.	49

Figura 31: Conductividades hidráulicas en [m/s] de los sedimentos en la zona de estudio. La mínima corresponde a 1.4×10^{-5} m/s, mientras que la máxima a 1.8×10^{-3} m/s. FUENTE: Elaboración propia.	50
Figura 29: Porcentajes acumulados de los caudales otorgados por la DGA en la zona de estudio. FUENTE: Elaboración propia.	51
Figura 30: Abatimientos provocados por un bombeo constante durante 24 horas. FUENTE: Elaboración propia con datos del Centro de Recursos Hídricos, DGA.	53
Figura 32: Colector vertical cerrado doble en forma de U. FUENTE: Elaboración propia.	54
Figura 33: Interpolación de los valores puntuales de sHE realizados sobre 58 pozos con información estratigráfica. FUENTE: Elaboración propia.	57
Figura 34: Plan regulador comunal de Talca. Las etiquetas corresponden a los nombres de las zonas urbanas. FUENTE: Municipalidad de Talca (2011).	59
Figura 35: Sectorización de la ciudad según categorías urbanas a partir del plan regulador comunal de Talca. FUENTE: Elaboración propia.	61
Figura 36: Diagrama de un pozo de extracción utilizado para sistemas GWHE y de las consideraciones a la hora de calcular la profundidad a perforar. FUENTE: Elaboración propia.	65
Figura 37: Profundidad a perforar para habilitar un sistema vertical abierto (GWHE) y el costo asociado a las perforaciones considerando un pozo de extracción y uno de reinyección en la ciudad de Talca. FUENTE: Elaboración propia.	67
Figura 38: Resultados de la profundidad de perforación y sus costos asociados para diferentes demandas de calefacción en la ciudad de Talca usando un sistema vertical cerrado (BHE). FUENTE: Elaboración propia.	69
Figura 39: Mapa de decisión de costos para una demanda de 2.52 [kW], usando sistemas verticales y el PRC de Talca. FUENTE: Elaboración propia.	75
Figura 40: Mapa de decisión de costos para una demanda de 2.82 [kW], usando sistemas verticales y el PRC de Talca. FUENTE: Elaboración propia.	75
Figura 41: Gradientes hidráulicos obtenidos a partir de las cotas hidráulicas. FUENTE: Elaboración propia.	95

Índice de tablas

Tabla 1: Fuentes principales de material particulado PM10 y PM2.5 en la ciudad de Talca. FUENTE: Plan de descontaminación atmosférica (Estrategia 2014 – 2018), Ministerio del Medio Ambiente.	15
Tabla 2: Costos asociados al uso de la calefacción en Chile. En negrita se encuentra resaltada la bomba de calor geotérmica. FUENTE: Territorio Verde; extraído de BB Solutions 2015.....	27
Tabla 3: Conductividades hidráulicas medias para diferentes medios no consolidados. FUENTE: Marsily (1986).	49
Tabla 4: Caudales concedidos por la DGA en Talca y la potencia a extraer a partir de Arola et al. (2014).....	51
Tabla 5: Cota superior de los abatimientos provocados por un bombeo a caudal constante por 24 horas. FUENTE: Elaboración propia.....	52
Tabla 6: Valores tabulados seleccionados de sHE para diferentes tipos de sedimento. FUENTE: Quaschnin (2016).	54
Tabla 7: Porosidad efectiva para diferentes tipos de sedimento. Fuente: Custodio & Llamas (1983).	56
Tabla 8: Resumen de la homologación del plan regulador con las zonas de limitantes espaciales. Se detallan las limitantes espaciales correspondientes a las superficies prediales mínimas y el área máxima del primer piso de cada vivienda según su ubicación en el PRC.....	62
Tabla 9: Resumen de las tipologías asignadas a cada zona del plan regulador y sus demandas asociadas.	63
Tabla 10: Demandas térmicas de cada tipología escogida en función del período de reglamentación térmica. Entre paréntesis se detalla el ahorro con respecto a una demanda bajo la normativa previa al año 2000. Fuente: Elaboración propia con datos de UNTEC (2014).....	64
Tabla 11: Caudal asociado y abatimiento puntual de cada tipología espacial. FUENTE: Elaboración propia.	65
Tabla 12: Energía específica máxima extraíble por colectores horizontales según norma VDI 4640. FUENTE: Pipelife (2015).....	70
Tabla 13: Área necesaria de colectores horizontales para satisfacer cierta demanda térmica. FUENTE: Elaboración propia.	71

Tabla 14: Resumen de decisión para sistemas horizontales cerrados. En la última columna se encuentra el resultado para cada zona urbana según su demanda asignada. FUENTE: Elaboración propia.....	71
Tabla 15: Áreas urbanas definidas en el plano regulador de Talca. FUENTE: Artículo 20, Municipalidad de Talca (2011).	82
Tabla 16: Niveles estáticos y cotas hidráulicas de los pozos utilizados para la creación de la Figura 15 y Figura 16. Los expedientes DGA corresponden a aquellos comenzados con ND y VPC. FUENTE: Derechos de aprovechamiento de aguas registrados en DGA, DGA.	86
Tabla 17: Niveles estáticos [m] pertenecientes a estaciones de observación de la DGA. FUENTE: Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea, DGA.....	87
Tabla 18: Abatimientos provocados por la extracción de cierto caudal constante en pruebas de bombeo de largo aliento (24 horas). FUENTE: Elaboración propia, con datos del Centro de Recursos hídricos, DGA.....	89
Tabla 19: Pozos utilizados en creación de perfil E - W. FUENTE: Alfaro (2011)...	90
Tabla 20: Pozos utilizados en creación de perfil N - W. FUENTE: Alfaro (2011). .	92
Tabla 21: Temperaturas medias mensuales de los últimos 30 años en la ciudad de Talca. FUENTE: DGA, estación "Talca, U.C."	93
Tabla 22: Temperaturas medias mensuales entre los años 1985 y 1993 en la ciudad de Talca. FUENTE: DGA, estación "Río Claro en Rauquén".	93
Tabla 23: Temperaturas estabilizadas en profundidad medidas por Investigador CEGA (2012) en la ciudad de Talca y utilizadas en este estudio. FUENTE: CEGA (2016).....	94
Tabla 24: Dimensionamiento de las viviendas propuestas por UNTEC (2014) y utilizadas en este estudio. FUENTE: UNTEC (2014).	96
Tabla 25: Materialidad de las tipologías propuestas por UNTEC (2014) y utilizadas en este estudio. FUENTE: UNTEC (2014).	98

1. Introducción

1.1 Formulación del estudio propuesto

La contaminación del aire, principalmente por material particulado del tipo PM10 y PM2.5 es uno de los mayores problemas que aquejan, hoy en día, a la salud de las personas. Son muchas las ciudades de nuestro país que, invierno tras invierno, se ven afectadas por este tipo de problema, el cual viene ligado directamente al uso de leña como medio de calefacción, principalmente por su fácil acceso y bajo precio, comparado con otras tecnologías. El número estimado de calefactores a leña, en la ciudad de Talca, es de 30746 (Ministerio del Medio Ambiente, 2013), mientras que el número de habitantes es de 264842 (INE, 2002). En la Figura 1 se observa que entre los meses de mayo y agosto es cuando más se utiliza la leña como método de calefacción (se incluyen sólo los datos de hogares que consumen leña).

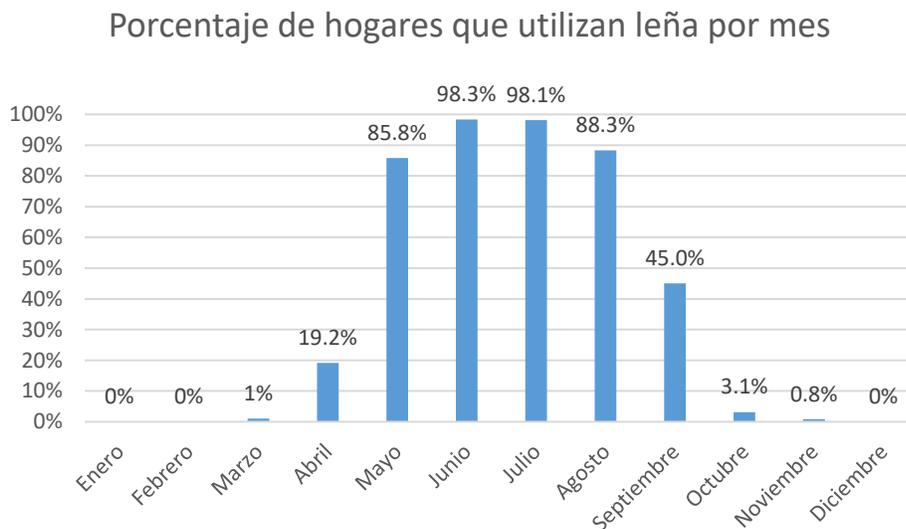


Figura 1: Porcentaje de hogares en Talca que utilizan leña por mes. FUENTE: Elaboración propia con datos de Ministerio del Medio Ambiente, 2013.

La geotermia es aquella rama de las ciencias de la tierra que estudia el origen, la dinámica y manifestación de la energía térmica de la Tierra. En particular, la geotermia de baja entalpía estudia lo que ocurre, térmicamente, en los sedimentos superficiales de la corteza terrestre y las aguas subterráneas, principalmente con la finalidad de implementar sistemas de aprovechamiento térmico para uso humano mediante aparatos diseñados exclusivamente con esta finalidad. Estas máquinas se conocen como bombas de calor, y realizan un intercambio que se vale de principios termodinámicos básicos.

En los últimos años, la ciudad de Talca ha visto restringido el uso de este medio de calefacción por preemergencias ambientales que han prohibido su uso durante algunos de los días más fríos del año, lo que conlleva al aumento de las emisiones producto de la calefacción residencial. Esto, asociado a las características topográficas de la ciudad, que limita al poniente con el Río Claro y el Cerro de La Virgen (Cordillera de la Costa),

propicia que altos niveles de PM10 y PM2.5, se concentren en la ciudad de Talca (ver Tabla 1).

Tipo de fuente	PM10 [ton/año]	%	PM2.5 [ton/año]	%
Fuentes fijas	187.7	14.8	134.2	11.4
Calefacción residencial leña	947.6	76.7	974.9	80.9
Incendios forestales	7.5	0.6	6.6	0.6
Quemas agrícolas	67.6	5.3	57.3	4.9
Fuentes móviles	32.8	2.6	25.9	2.2
Total	1270.2	100	1171.9	100

Tabla 1: Fuentes principales de material particulado PM10 y PM2.5 en la ciudad de Talca. FUENTE: Plan de descontaminación atmosférica (Estrategia 2014 – 2018), Ministerio del Medio Ambiente.

Con este estudio se espera proponer una alternativa limpia y de una alta eficiencia a largo plazo que se sustente en información geológica e hidrogeológica de la ciudad de Talca. La propuesta entregada permitirá una toma de decisiones, ligada a una política energética eficiente, informada, responsable y basada en datos concretos.

Este trabajo fue realizado en el marco del proyecto el FONDAP/CONICYT N°15090013 (Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes, CEGA) para buscar soluciones inteligentes a las ciudades con elevada contaminación atmosférica mediante el uso directo de la energía geotérmica.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos principales

Evaluar la factibilidad de aplicación de las distintas posibles aplicaciones de bombas de calor geotérmicas para calefacción en el plano urbano de la ciudad de Talca.

1.2.2 Objetivos específicos

- Crear una base de datos con información recabada de los pozos inscritos en la DGA existentes en la zona de estudio.
- Calcular y estudiar los parámetros hidrogeológicos elásticos del acuífero bajo la ciudad.
- Estudiar las características del relleno sedimentario bajo la ciudad de Talca.
- Estimar el coeficiente de rendimiento (COP) correspondiente a los sistemas verticales abiertos (GWHE) y horizontales cerrados para una temperatura de confort de 20°C en invierno.
- Estimar las demandas térmicas actuales en calefacción doméstica en base a la materialidad y distribución de los hogares y a su correlación con tipologías propuestas por UNTEC (2014).
- Construir un mapa de distribución de tipos de bombas de calor geotérmicas para calefacción en una escala de, al menos, 1:50000.

- Revisar los aspectos y limitantes legales asociadas a la instalación de sistemas geotérmicos de baja temperatura en Chile.

1.3 Metodología

1.3.1 Creación de una base de datos

Mediante la compilación de información procedente del centro de recursos hídricos de la Dirección General de Aguas (DGA) se creará una base de datos con información de pozos que contenga ubicación (WGS 1984 – 19S), niveles estáticos, caudal otorgado al solicitante, pruebas de bombeo, tipo de obra (pozo o noria) y estratigrafía disponible.

1.3.2 Hidrogeología

Determinar las propiedades elásticas del acuífero (transmisividad y conductividad hidráulica) mediante pruebas de bombeo de gasto constante y recuperación usando el método de Theis en *AquiferTest* con información de expedientes de la DGA e informes existentes de la DGA. Usando el método de *kriging* ordinario omnidireccional en ArcGis 10.2, generar mapas de niveles estáticos y cotas hidráulicas. La topografía será obtenida desde un DEM perteneciente al satélite ALOS PALSAR (*Alaska Facility*) cuya resolución horizontal es de 12.5 x 12.5 m².

1.3.3 Estratigrafía

Descripción de las unidades geológicas del relleno sedimentario bajo la ciudad de Talca. Para esto, se usarán datos compilados por Leyton et al. (2010) y Alfaro (2011). Se realizarán 2 perfiles estratigráficos que crucen la ciudad: uno norte – sur y otro este – oeste, con el fin de conocer estratigrafía tipo a gran escala bajo la zona de estudio. Además, se realizará una revisión de la profundidad del basamento rocoso bajo la ciudad de Talca con información gravimétrica obtenida de Quiroz (2014) y GCF Ingenieros Ltda. (2010).

1.3.4 Coeficientes de rendimiento

Con datos recabados en terreno por el Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) en octubre de 2012 crear un mapa de distribución de temperatura de las aguas subterráneas y estimar el COP para GWHE. Para el caso de los intercambiadores horizontales cerrados, estimar la temperatura del subsuelo a cierta profundidad con datos meteorológicos existentes en la ciudad y estimar el COP. Los valores de COP asociados a cada uno de estos sistemas se calcularán en cada caso para una temperatura de confort de 20°C (Molina & Veas, 2012).

1.3.5 Demandas térmicas y potencia extraíble

Determinar las demandas térmicas unitarias en base al plano regulador comunal de Talca y a las demandas calculadas por la UNTEC¹ para diferentes tipologías, las que abarcan hogares desde los 33 m² a los 85 m². Para esto, se revisarán las diversas zonas residenciales de la ciudad y se asignarán tipologías de vivienda, con una demanda térmica asociada, que sean representativas para cada zona y que cumplan con las exigencias del plan regulador. Se calcularán, además, las potencias nominales extraíbles usando intercambiadores de calor verticales abiertos y cerrados.

1.3.6 SIG

Crear zonas de limitantes espaciales a partir de las zonas urbanas definidas en el plan regulador usando los parámetros de coeficiente de ocupación² y superficie predial mínima³; esto se hará con el fin de conocer en qué lugares cabe espacialmente o no cierto sistema. En base a la potencia nominal extraíble por cada sistema y a las demandas unitarias asignadas en la sección 1.3.3, se calculará la profundidad a perforar para los sistemas verticales.

¹ Universidad y tecnología: Fundación para la transferencia tecnológica creada por la Universidad de Chile.

² Tamaño mínimo que puede tener, en m², determinado predio urbano.

³ Porcentaje del predio que fija el máximo de metros cuadrados posibles de construir en el primer piso.

1.4 Antecedentes

1.4.1 Bomba de calor geotérmica

En la geotermia de baja temperatura, la temperatura del recurso se encuentra a menos de 90°C, en un rango entre 10 a 20°C, a una profundidad de alrededor de 100 m. La energía se extrae usando bombas de calor y se utiliza para calefaccionar viviendas individuales. Este sistema utiliza energía eléctrica para su funcionamiento, la que se usa para hacer funcionar las bombas y comprimir los gases que son calentados por el fluido intercambiador de calor. El ciclo básico de calefacción se ilustra en la Figura 2.

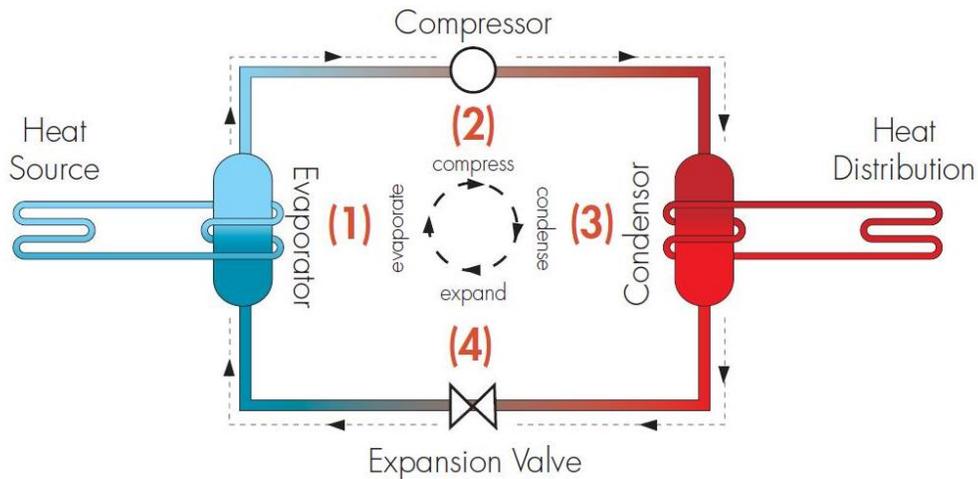


Figura 2: Ciclo de funcionamiento de una bomba de calor en modo calefacción. Cordis (2016).

El funcionamiento de una bomba de calor en modo calefacción se basa en los siguientes pasos:

1. Intercambio de calor desde la fuente hacia el fluido refrigerante.
2. Compresión de fluido refrigerante para aumentar su temperatura.
3. Condensación del fluido refrigerante e intercambio de calor con sistema de distribución (radiador, losa radiante, ventiloconvector⁴, etc.)
4. Expansión del fluido para bajar su temperatura y volver a entrar al ciclo de la bomba.

El recurso, en este estudio, corresponde al calor alojado en el subsuelo, es decir, el relleno sedimentario y el acuífero. La base sobre la que se sustenta su funcionamiento en invierno es aprovechar la temperatura en profundidad a partir de la zona del límite de

⁴ Del inglés, *fancoil*.

variación estacional, la cual generalmente se ubica entre 10 a 15 metros de profundidad (Figura 3).

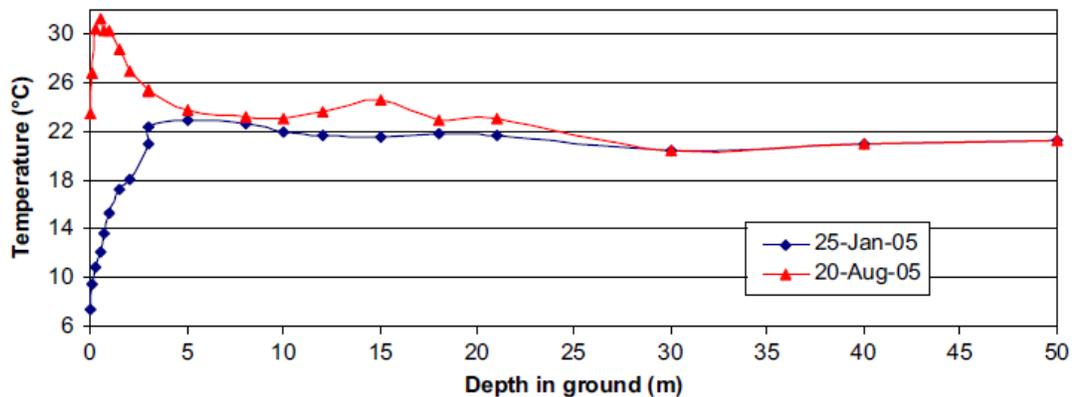


Figura 3: Variación de la temperatura con respecto a la profundidad en verano (Aug-05) y en invierno (Jan-05). FUENTE: Florides & Kalogirou (2007).

1.4.1.1 Dimensionamiento del sistema

Conocidos parámetros como el clima local y las demandas térmicas asociadas a cierto tipo de vivienda, se puede calcular una potencia máxima en términos de calefacción. Considerando la distribución de temperatura en invierno se infiere que las temperaturas más frías del año, que coincidirían con los *peaks* de demanda en calefacción, ocurren durante pocos días en invierno. Dado que el costo inicial del sistema es alto, tiene sentido el escoger esta temperatura mínima para cubrir una demanda la mayor parte de los días más fríos.

En países de Europa como Suecia o zonas de Escandinavia, ha sido demostrado por Rosén et al. (2001) que usando una bomba de calor geotérmica dimensionada a un 60% de la demanda máxima anual se puede suministrar hasta un 90% de la energía térmica requerida por la vivienda durante la temporada de calefacción. Este valor tiene ventajas económicas, ya que permite implementar un sistema menos potente. Existen también ventajas de operación, ya que un sistema dimensionado para el 100% de la demanda térmica máxima trae consigo entradas y salidas de operación constantes por parte del compresor, lo que reduciría la vida útil de la bomba de calor.

1.4.2 Tipos de intercambiadores de calor

Existen sistemas abiertos y cerrados (verticales y horizontales), los cuales se ocupan dependiendo de la disponibilidad de espacio, demanda térmica y disponibilidad de agua subterránea, entre otros factores. A continuación, se describen con mayor detalle los sistemas a evaluar en este estudio.

1.4.2.1 Sistemas abiertos (GWHE⁵)

La mayor parte de la energía se encuentra alojada en los sedimentos. El agua entonces se equilibra térmicamente con los sedimentos y por lo tanto es un excelente medio para extraer o disipar calor en los sedimentos. El líquido que transporta el calor es el agua misma del acuífero. Se requieren al menos 2 pozos: uno de extracción y uno de reinyección, que debe estar aguas abajo en el acuífero (Figura 4). Es por esto que es importante conocer las cotas hidráulicas y el correspondiente flujo subterráneo de las aguas. Para esta aplicación se requieren derechos no consuntivos en la DGA, ya que el agua se reinyecta, sin embargo, debe seguir el mismo trámite administrativo de solicitud de explotación de aguas contemplado por la DGA (DGA (2008) en Seisedos, 2012).

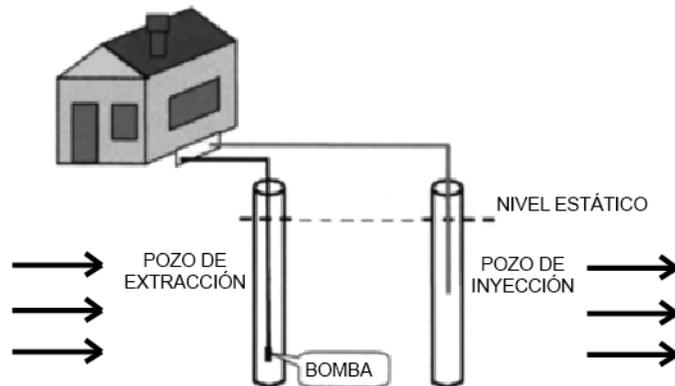


Figura 4: Groundwater heat exchanger. Las flechas indican la dirección de flujo de las aguas subterráneas. FUENTE: Modificado de Florides & Kalogirou (2007).

1.4.2.2 Sistemas cerrados

El reservorio es el relleno sedimentario, que puede estar o no saturado de agua. El líquido que intercambia el calor usualmente es una mezcla de agua con anticongelante. El sistema puede ser vertical (BHE⁶) u horizontal (Figura 5), dependiendo de las demandas térmicas y de la disponibilidad de espacio para su instalación. Un sistema vertical cerrado es capaz de proveer más energía que uno horizontal, ya que el área de intercambio de calor es mayor.

⁵ GWHE: *Groundwater Heat Exchanger*, por sus siglas en inglés.

⁶ BHE: *Borehole Heat Exchanger*, por sus siglas en inglés.

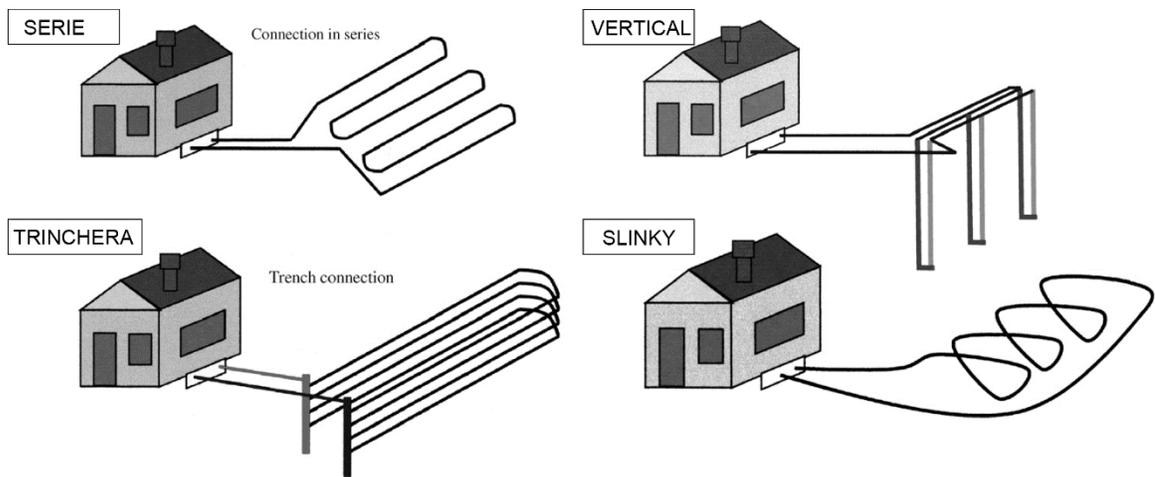


Figura 5: Intercambiadores de calor cerrados. FUENTE: Florides & Kalogirou (2007).

1.4.3 Legales

En Chile, actualmente, existe una ley desde el año 2000 (Ley 19.657) que regula las concesiones geotérmicas y que pretende facilitar el procedimiento de solicitud y obtención de derechos sobre recursos geotérmicos. Esta ley, sin embargo, no considera una diferencia entre recursos de alta o de baja temperatura, ni si contemplan la generación de energía eléctrica o usos directos, además de ser poco precisa con respecto a las formas de extracción de calor. El artículo 3° de la Ley 19.657 reza lo siguiente: “(la energía geotérmica es) aquella que se obtenga del calor natural de la tierra, que puede ser extraída del vapor, agua, gases, excluidos los hidrocarburos, o a través de fluidos inyectados artificialmente para este fin”.

En el caso de decantar por un sistema vertical abierto, el procedimiento que rige la constitución del derecho viene dado por el Código de aguas (1981), donde se regulan y detallan los procesos que deben seguirse para solicitar un derecho de agua no consuntivo, el que permite emplear el agua sin consumirla y obliga a restituirla en la forma que lo determine el acto de adquisición o de constitución del derecho.

1.4.3.1 Sistemas verticales abiertos

Para hacer uso de un sistema vertical abierto se debe solicitar un derecho no consuntivo a la Dirección General de Aguas. La guía completa para realizar una solicitud de aprovechamiento subterráneo se encuentra en la *web* de la DGA (2015).

Para solicitar un derecho de aprovechamiento de agua, debe presentarse una solicitud al director general de aguas, la cual deberá ser ingresada en la oficina de partes de la DGA de la provincia en que se encuentra ubicada la captación, en este caso, en Talca. En dicha solicitud debe detallarse toda la información que concierne al derecho, entre las más importantes la ubicación, la naturaleza de la captación (subterránea o superficial), caudal solicitado y si es consuntivo o no. Es importante el detallar, en coordenadas UTM, los puntos de extracción y reinyección, además de la distancia entre los pozos y su desnivel. Estos son los principales errores en que se incurre al solicitar un derecho y, por

lo tanto, agregan tiempo al ser rechazada la solicitud (Código de aguas (1981) en Vielma 2013).

Este es un proceso que, si bien no tiene costo, sí debe incurrirse en gastos asociados a las publicaciones en prensa, Diario Oficial y todos aquellos relacionados con la construcción, pruebas y habilitación del pozo.

La Región del Maule presenta zonas de restricción asociadas a escasez del recurso de agua subterráneo en las zonas de Teno – Lontué (provincia de Curicó) y en los esteros Belco y Arenal (provincia de Cauquenes). En dichas zonas se podrán otorgar, solamente, derechos con carácter de provisorio. En la provincia de Talca no se registran áreas de restricción ni zonas de prohibición (Figura 6. DGA, 2017).

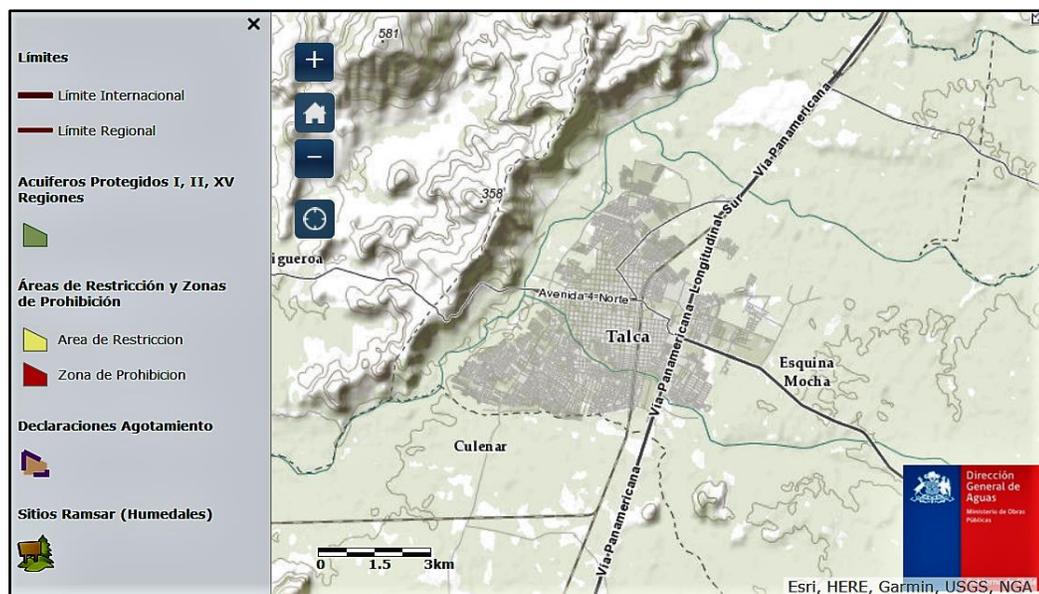


Figura 6: Estado de protección de los recursos de agua subterránea en la zona de estudio. Se observa que no existe restricción ni prohibición en Talca. FUENTE: DGA (2017).

1.4.3.2 Sistemas verticales y horizontales cerrados

En Chile, los proyectos de baja entalpía que usan estos sistemas no han solicitado permisos de exploración ni explotación geotérmica. El Ministerio de Energía ha tomado razón de esto, pero dado que se trata de una tecnología relativamente incipiente en el país, no ha fiscalizado los proyectos ya que se tiene conocimiento de que es una ley poco amigable para proyectos pequeños y/o particulares. No existen, entonces, trabas legales asociadas a sistemas cerrados.

1.5 Clima

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

Con el fin de contrastar las variaciones geográficas de las temperaturas en la ciudad, se utilizaron datos de las 2 estaciones pertenecientes a la DGA que cuentan con los registros más extensos a lo largo del tiempo: "Talca U.C." y "Río Claro en Rauquén". Dichas estaciones se encuentran en puntos opuestos de la ciudad. El objetivo de esta comparación es el de utilizar los datos climáticos (temperatura) de solo una de ellas, para calcular el COP. Se usará la con mayor cantidad de datos a lo largo de los años, en este caso "Río Claro en Rauquén".

1.5.1 Estación "Talca U.C."

En la Figura 7 se observa la fluctuación de las temperaturas medias anuales en Talca en un período de 30 años. Se observa que esta temperatura ronda los 14.5°C. El año 2007 tiene una fuerte caída debido a que los meses de junio, julio y agosto promediaron temperaturas mucho menores a las medidas en fechas anteriores (Ver Anexo 8.3).

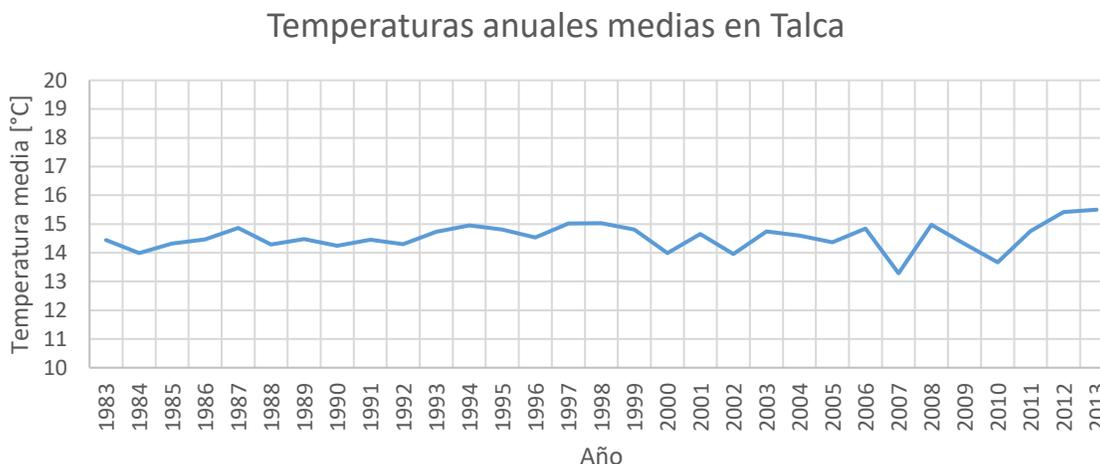


Figura 7: Temperaturas medias anuales para la ciudad de Talca en un período de 30 años. FUENTE: DGA (estación "Talca U.C.).

Se observa además en la Figura 8 la fluctuación de las temperaturas anuales en la ciudad. La temperatura es menor a 20°C (considerada de confort) prácticamente todo el año.

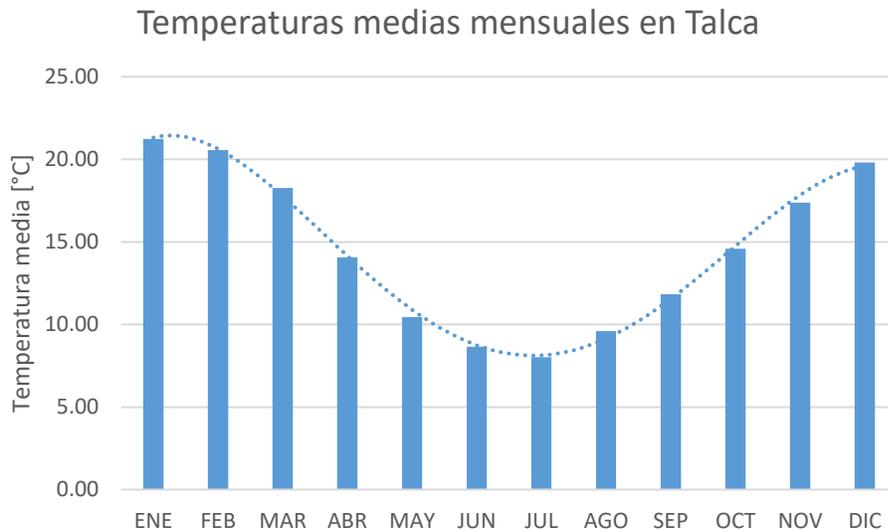


Figura 8: Temperatura media mensual de los últimos 30 años en Talca. FUENTE: DGA (estación "Talca U.C").

1.5.2 Estación "Río Claro en Rauquén"

Se comparará un período entre los años 1985 y 1993 con "Talca U.C". En la Figura 9 se observa la bajísima diferencia presentada en las temperaturas medidas por ambas estaciones. El caso con mayor diferencia corresponde al mes de diciembre, con una delta de hasta 1 °C. Los meses de invierno (junio, julio y agosto) tienen diferencias menores a 0.1 °C. Para mayor detalle de los promedios mensuales consultar Anexo 8.3.2.

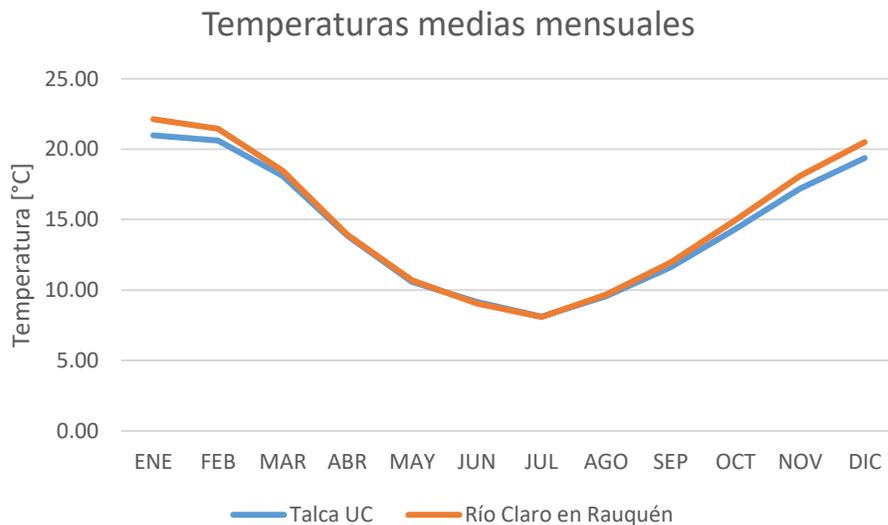


Figura 9: Temperaturas medias mensuales para las estaciones "Talca U.C." y "Río Claro en Rauquén". Período de tiempo entre 1985 y 1993. FUENTE: DGA.

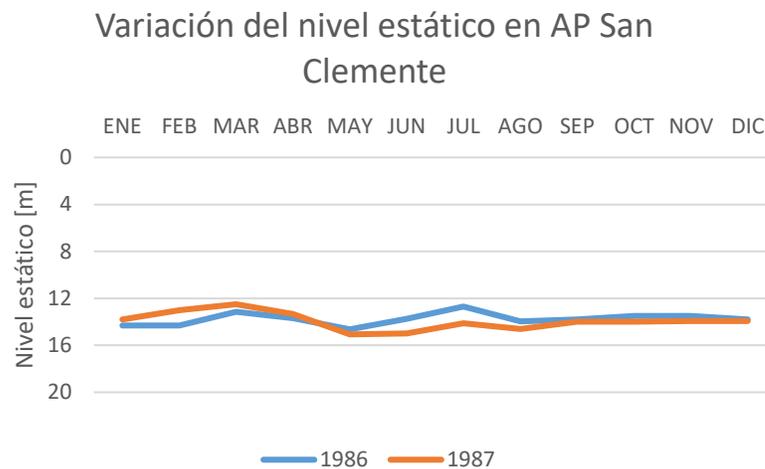
Con el fin de obtener el COP para los sistemas horizontales cerrados en un suelo promedio de la ciudad, se utilizará de aquí en adelante las temperaturas medias diarias

en la estación “Talca U.C.” ya que cuenta con un registro histórico más extenso y como se observa, se puede correlacionar de buena manera con la estación “Río Claro en Rauquén”, ya que presentan diferencias mínimas.

1.6 Variaciones estacionales del nivel estático

En general, la profundidad de los niveles estáticos en el valle central entre los 34°S y 38°S decrece desde la Cordillera de los Andes hacia la Cordillera de la costa, sin embargo, existen irregularidades tales como ondulaciones fuertes del terreno o acuíferos “colgados”. La fluctuación del nivel estático se ve controlada principalmente por 2 factores: explotación y precipitaciones (Hauser, 1995). Los niveles estáticos más profundos corresponden a los meses entre noviembre y febrero, coincidiendo con la estación seca y con la aparición de gran cantidad de vegetación, mientras que niveles más someros se notan hacia la estación húmeda, es decir entre mayo y agosto, donde, en general, se registra aproximadamente el 85% de las precipitaciones en el área (Hauser, 1995).

En la Figura 10 se pueden observar las fluctuaciones para 2 pozos pertenecientes a la red de observación de la DGA. La máxima fluctuación en el período de tiempo de medición en el caso de AP San Clemente es de 3 metros, mientras que en AP Talca es de 2 metros. Durante el año, esta variación es similar. Lamentablemente, no se cuenta con datos de años más recientes. En base a estas observaciones, se considerará una variación máxima del nivel estático de hasta 3 metros en un año.



Variación del nivel estático en AP Talca

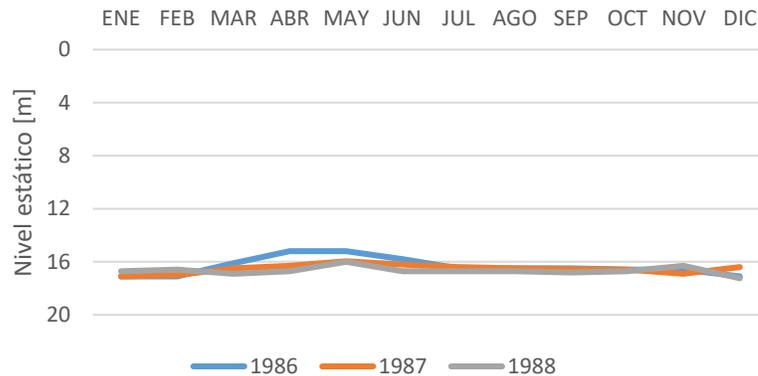


Figura 10: Fluctuaciones anuales para 2 estaciones del observatorio de la DGA. Notar que el eje vertical se encuentra invertido. FUENTE: Elaboración propia con información oficial hidrometeorológica y de calidad de aguas, DGA.

1.7 Estudios similares

Gáinza (2014) realizó una estimación del potencial geotérmico de baja temperatura en la cuenca del Maule mediante la determinación de la profundidad del agua subterránea en la cuenca a una escala de 1:600000 aproximadamente, donde concluye que la implementación de sistemas intercambiadores de calor y bombas de calor geotérmicas es totalmente factible en la Región del Maule para sistemas BHE y GWHE y un promedio de demanda energética en términos de calefacción de 6000 [kWh/año], sin embargo, el estudio carece de detalle.

Muñoz et al. (2015) realizaron un estudio en la cuenca de Santiago (33.5°S), donde estiman una demanda energética, en términos de calefacción, de 2.7 [kW] para una casa de entre 50 y 71 [m²], suponiendo un aislamiento térmico apropiado. Se consideró la perforación de 2 pozos en el caso de GWHE y 1 pozo en el caso de BHE. Se concluye que para suplir la demanda estimada se deben perforar entre 35 y 105 metros para sistemas BHE (con un promedio de 58 [m]) y entre 10 y 400 metros para sistemas GWHE (con un promedio de 68 m). En el caso de BHE, la profundidad del nivel estático es importante por la mayor conductividad térmica de los sedimentos saturados. Zonas con niveles estáticos más someros son favorables para la instalación de ambos tipos de sistemas. Otro factor a tomar en cuenta en la elección de un sistema por sobre el otro es la variabilidad estacional de los niveles estáticos, por lo que para los GWHE habría que considerar una profundidad de seguridad.

El trabajo de Schiel et al. (2016) en Ludwigsburg, Alemania es similar al que se pretende realizar en esta instancia. En él, se realiza una sectorización de la ciudad en base a las demandas térmicas de cada zona y con esto se calcula la fracción de demanda satisfecha por bombas e intercambiadores de calor. Finalmente, se calcula la potencial reducción en emisiones de CO₂, la cual se estima en aproximadamente 29.7 %. Hay que considerar, sin embargo, que la principal fuente de energía utilizada para calefacción es el gas y los

combustibles fósiles, fuentes con menores emisiones basales de CO₂ que la leña, medio de calefacción predominante en Chile.

1.8 Aplicaciones de la geotermia de baja temperatura en Chile

En Chile existen cerca de 30 proyectos que usan esta tecnología (Ministerio de Energía, 2016), donde la mayor cantidad de proyectos han sido implementados por la empresa Enalteco en la Región del Bío Bío.

Una solución de geotermia de baja temperatura con intercambiadores de calor existe en Chile en la localidad de Santa Juana, en la Provincia de Concepción. En este caso, existen soluciones en el mercado que implementan sistemas intercambiadores cerrados enterrados a 1.5 m de profundidad, con un área de intercambio de calor de 12.6 m² en un suelo de composición arena arcillosa. Este sistema provee un total de 4kW, con un *input* energético de 1kW (COP = 4; Ver sección 3.3). La geometría del intercambiador es similar a la de la Figura 5 (trinchera).

Implementaciones llevadas a cabo por la empresa “Geotermika” son utilizadas para calefacción de recintos tales como el Hotel Colonos del sur en Puerto Varas, el hotel Cabañas del lago en Puerto Varas, el colegio San Francisco Javier de Puerto Montt, el colegio alemán de Puerto Varas, entre muchos otros. Además, se usa para calefaccionar pisciculturas, por ejemplo, en Río Blanco o en Chiloé. En la Universidad Católica del Maule, Talca, han implementado un sistema de climatización con intercambiadores verticales cerrados. Dicha implementación no cuenta con la concesión del Ministerio de energía para explotación geotérmica (Ver sección 1.4.3.2).

El costo de operación en calefacción de las bombas de calor es el más bajo de todos los sistemas calefactores utilizados en Chile. En la Tabla 2 se exponen los valores asociados al uso de esta tecnología, en comparación con otras actualmente en uso (Territorio Verde: extraído de BB Solutions 2015). En el caso de la bomba de calor geotérmica, el calor aprovechado excede el 100%, ya que se asume un COP = 4 (ver sección 3.3.1).

Método de calefacción	Precio unitario [CLP]	Calor aprovechado	Costo calor [CLP/kWh]
Leña 20% humedad en estufa eficiente [kg]	150	80%	43.8
Pellets de aserrín en estufa Bosca <i>Spirit</i> [kg]	215	85%	56.27
Gas licuado sin descarga de gases al exterior [kg]	1044	100%	81.17
Kerosene sin descarga de gases al exterior [lt]	730	100%	76.23
Estufa eléctrica, tarifa normal [kWh]	81	100%	81
Estufa eléctrica, tarifa sobreconsumo [kWh]	112	100%	112
Bomba de calor, tarifa normal [kWh]	81	300%	27
Bomba de calor, tarifa sobreconsumo [kWh]	112	300%	37

Tabla 2: Costos asociados al uso de la calefacción en Chile. En negrita se encuentra resaltada la bomba de calor geotérmica. FUENTE: Territorio Verde; extraído de BB Solutions 2015.

1.9 Hipótesis de trabajo

La evidencia expuesta, con respecto a la alta contaminación que sufre la ciudad en los meses de invierno debido al uso indiscriminado de leña, hace desear una propuesta que intente mitigar esta situación. Si bien, existe una respuesta oficial del Ministerio del Medio ambiente en forma de una estrategia para el período comprendido entre los años 2014 – 2018, esta no considera el uso de tecnologías como las bombas de calor geotérmicas, las que han demostrado ser el método más eficiente de calefacción en términos de calor aprovechado. Esto, sumado a la calidad del acuífero en Talca y sus bajísimas variaciones estacionales en verano hacen suponer que una correcta zonificación de la ciudad de Talca basada en las demandas energéticas para climatización doméstica, permitiría una mejor toma de decisiones a la hora de usar sistemas de climatización con *cero-emisión*, en particular los de geotermia de baja entalpía con bombas de calor, que tienen bajos costos de operación. Esta zonificación se llevaría a cabo mediante un estudio de la hidrogeología del acuífero bajo la ciudad y del relleno sedimentario de esta sub-cuenca, de tal manera que se pudiera decidir el tipo de sistema más apropiado para cada zona dentro del límite urbano, conociendo la oferta energética disponible.

2. Marco geológico

2.1 Segmentación morfológica e hidrografía

La ciudad de Talca se encuentra a los 35°25'S en una unidad geomorfológica longitudinal de orientación norte – sur conocida como Depresión Central, ubicada entre las Cordilleras de la Costa y de Los Andes (Figura 11). Esta Depresión se extiende desde los 33°S aproximadamente hasta los 40°S, es decir más de 1000 km. Corresponde a un valle que contiene principalmente depósitos aluviales y volcánicos cuaternarios pleistocenos a holocenos con un relieve que disminuye lentamente de este a oeste, con una inclinación topográfica menor a 1°.

La zona de estudio se enmarca dentro de la hoya hidrográfica del Río Maule. La ciudad es flanqueada al oeste por el Río Claro, que corre paralelo al límite de la Cordillera de la Costa en un rumbo NE - SW, haciendo de tributario para el Río Maule hacia el SW. Al norte de Talca corre el Río Lircay, el que tributa al Claro en las cercanías del sector de Alto Pangue y más al norte, con una relevancia menor, el Estero Pelarco (Figura 11).

2.2 Geología

2.2.1 Basamento impermeable: Fm. Veta Negra

El relleno sedimentario cuaternario sobreyace a rocas pertenecientes a la Fm. Abanico y la Fm. Veta Negra (miembros Culenar, Estratos de Litu e Ignimbritas de Cerro Caupolicán). En la Figura 11 se observa la geología propuesta por Morales (2014), en que la Cordillera de la Costa aledaña a Talca se encuentra formada por las rocas del miembro El Culenar y un intrusivo granodiorítico de edad cretácica.

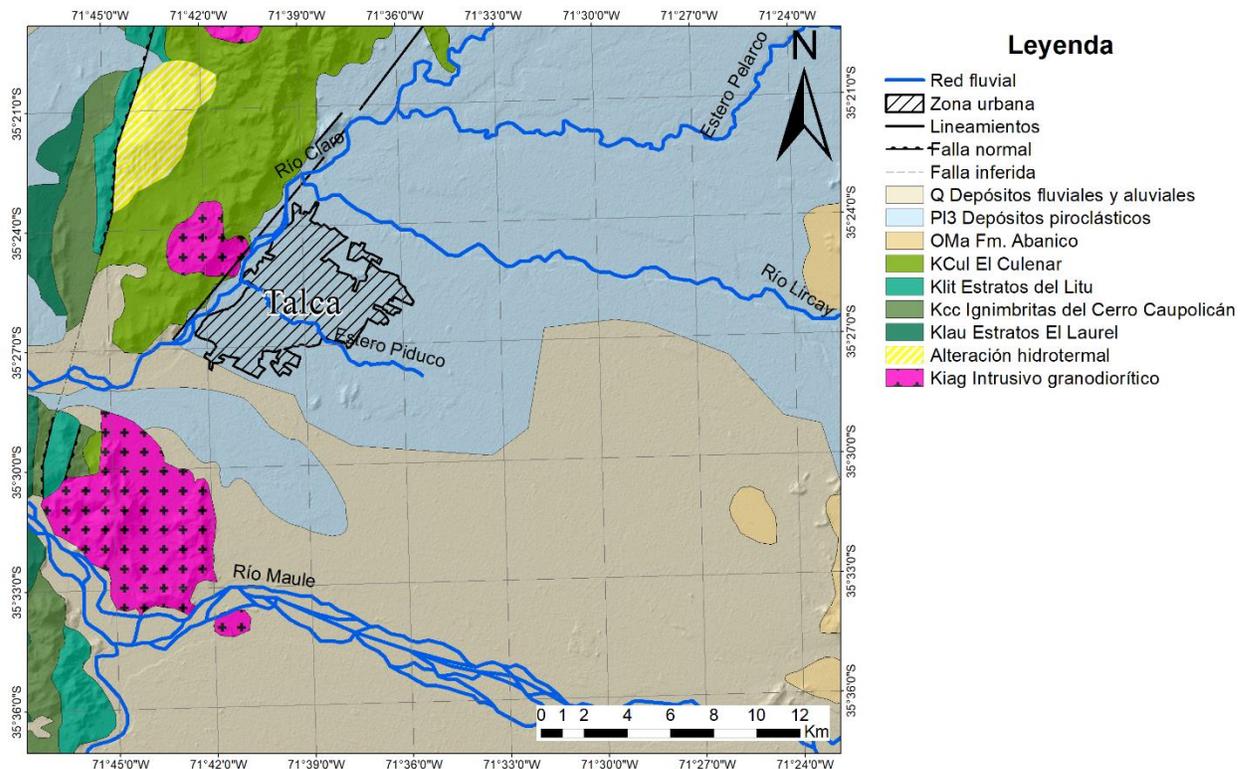


Figura 11: Detalle de la geología de la zona, propuesta por Morales (2014). Se presenta, además, la hidrografía superficial.

La Cordillera de la Costa es la prominencia principal de esta zona, alcanzando alturas de hasta 580 metros en cerros cercanos a la ciudad de Péncahue las que pertenecen a las unidades Ignimbritas del Cerro Caupolicán, Formación Culenar y Estratos de Litu, pertenecientes a la Fm. Veta Negra.

Las unidades estratificadas pertenecientes a la zona de estudio se ubican al oeste de Talca, y no comprenden una importancia hidrogeológica significativa ya que poseen una muy baja permeabilidad asociada a zonas de roca fracturada y/o superficialmente alterada. Estas rocas constituyen una barrera a las aguas subterráneas provenientes desde el este, encauzándolas en el Río Claro.

La Formación Veta Negra ha sido reconocida por Bravo (2001) en la zona. Afloran aquí 4 miembros: Las ignimbritas del Cerro Caupolicán, Estratos de Litu, Formación Culenar y Estratos El Laurel. Esta última es la única dentro de la zona de estudio, la más somera y comprende un conjunto de brechas volcánicas de color gris a gris verdoso con andesitas porfídicas, reconociéndose ininterrumpidamente desde el Río Mataquito hasta el río Claro, en una franja de rumbo aproximado N20E. Este miembro, junto con Los Estratos de Litu se pueden correlacionar con el miembro superior de la Fm. Veta Negra (Ocoa). Se les puede asignar una edad Barremiano – Albiano por sus correlaciones con el miembro mencionado.

2.2.2 Gravimetría del valle central

En la zona existen levantamientos gravimétricos realizados por Quiroz (2014) y por GCF Ingenieros Ltda. (2010), los que se presentan en la Figura 12 con el detalle de cada perfil en la Figura 13. Quiroz concluye que, utilizando un relleno sedimentario con densidad promedio de 2.0 g/cc, se obtienen profundidades del basamento de alrededor de 500 metros, observándose que el espesor del relleno tiende a aumentar hacia el sur, lo que se corrobora en los perfiles L8 y L9.

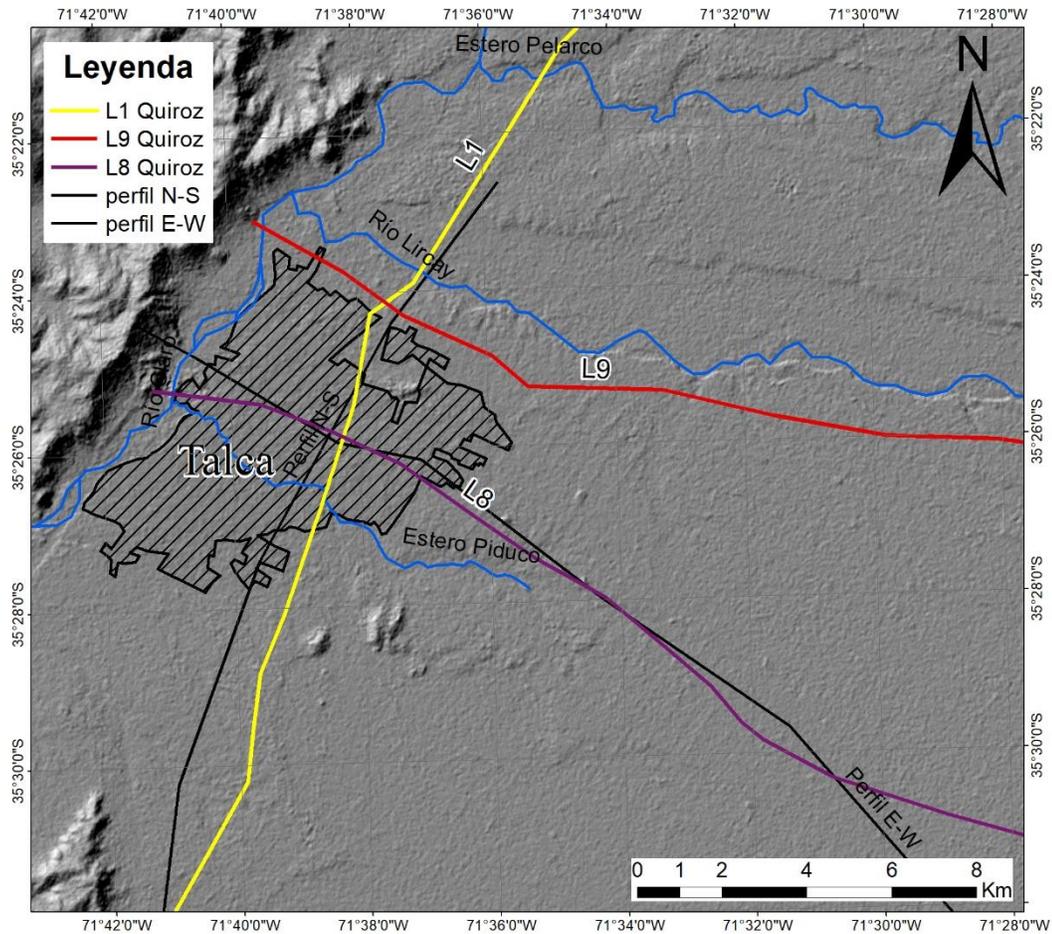


Figura 12: Perfiles gravimétricos en la zona de estudio. FUENTE: Recopilación de GCF Ingenieros Ltda. 2010, Quiroz 2014 y elaboración propia (estratigráficos: N-S y E-W).

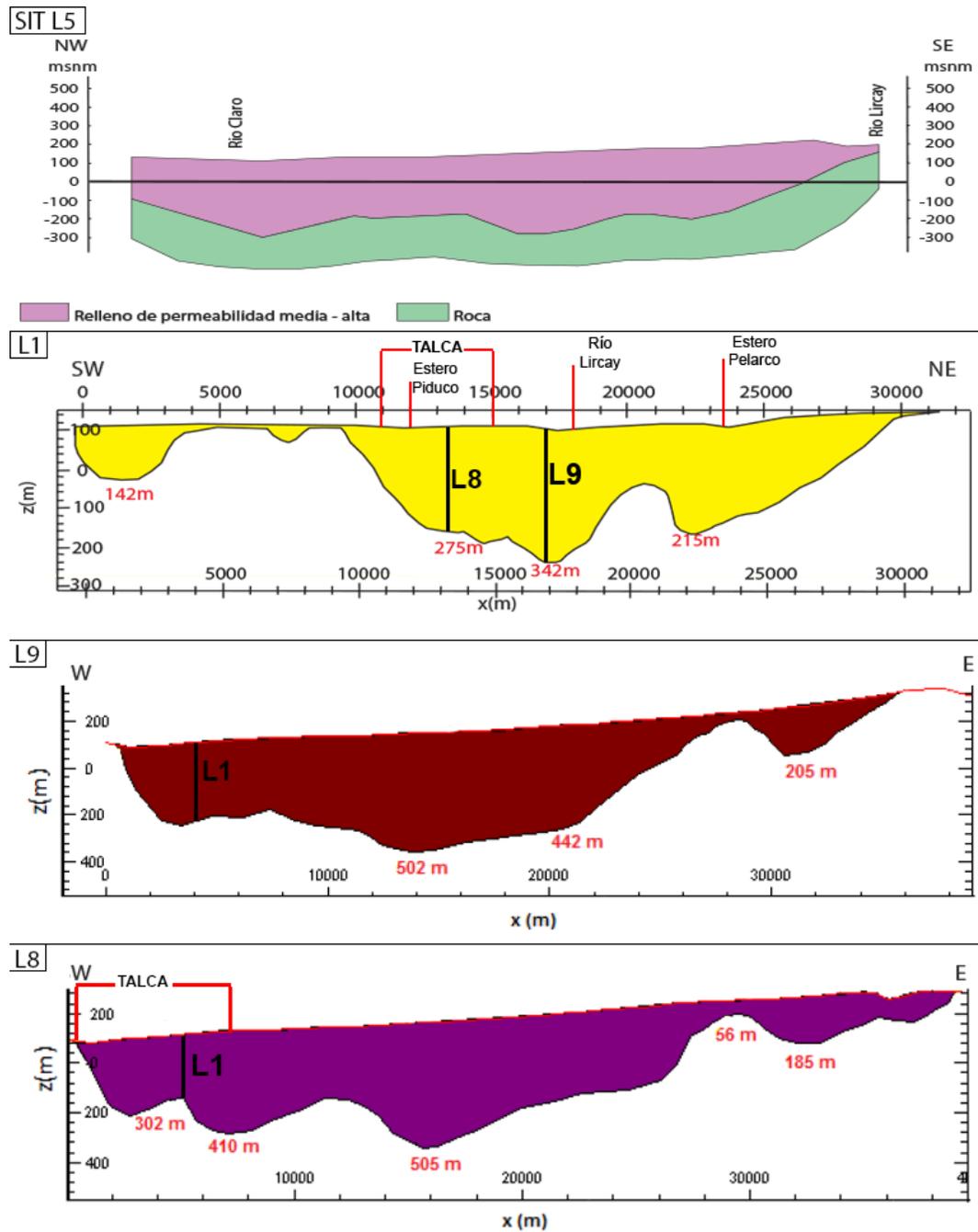


Figura 13: Perfiles gravimétricos de norte a sur del relleno sedimentario de la cuenca de Talca. FUENTE: Modificado y compilado de Quiroz (2014): L1, L8 y L9 y GCF Ingenieros Ltda. (2010): SIT L5.

2.2.3 Hidrogeología del relleno sedimentario cuaternario

El relleno sedimentario ha sido reconocido por Arturo Hauser en la Carta hidrogeológica de Talca y se detalla a continuación (Figura 14):

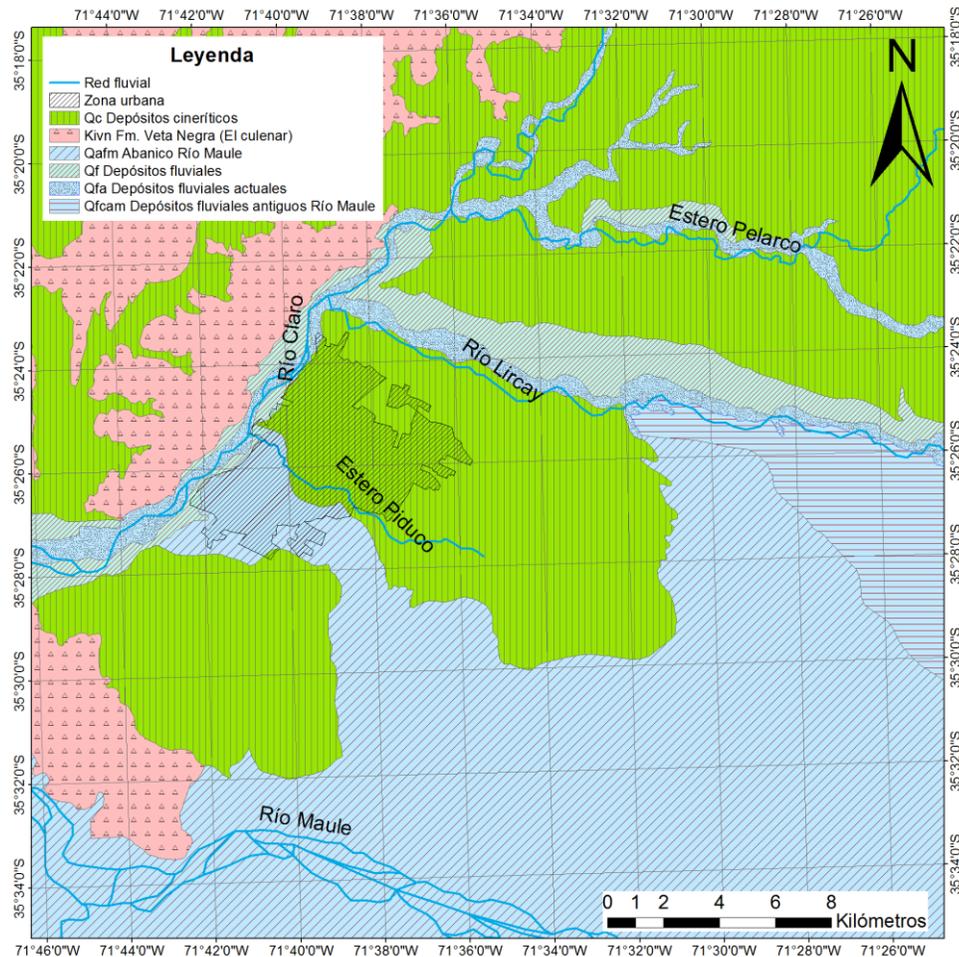


Figura 14: Unidades hidrogeológicas de la zona de estudio. Los colores indican la importancia hidrogeológica relativa, desde el celeste, verde a rojo con alta, media y baja, respectivamente. FUENTE: Detalle de Hauser (1995).

2.2.3.1 Depósitos cineríticos

Esta unidad ha sido reconocida por Varela & Moreno (1982) como el Abanico piroclástico del Río Claro – Talca, de edad pleistocena, asociada al grupo volcánico Descabezado Grande.

Se compone de una potente secuencia de bancos alternantes de cenizas y lapilli de carácter ácido en un conjunto denso, bien cementado constituidos por esquirlas vítreas, cristales de plagioclasa y fragmentos de pómez, con permeabilidad media a baja y significativas variaciones laterales. Los acuíferos, confinados a semiconfinados, están radicados en niveles de origen volcánico con intercalaciones limoarcillosas y poseen

transmisividades entre 200 – 1500 m²/día y coeficientes de almacenamiento entre 10⁻⁴ y 10⁻⁵ (Hauser, 1995).

2.2.3.2 Abanico del Río Maule

Morfológicamente, estos depósitos constituyen un extenso llano con suave inclinación hacia el oeste. Es una secuencia conformada predominantemente por bancos de rípios gruesos, gravas y gravas arenosas con ocasionales intercalaciones lenticulares limoarcillosas. Los clastos son subredondeados, heterocomposicionales y resistentes. Existe un descenso gradual en el tamaño de las fracciones clásticas en sentido este – oeste. El espesor de esta unidad varía entre 50 y 60 m.

Con respecto a las características hidrogeológicas, presenta una permeabilidad media a alta, con buena capacidad para conducir y almacenar agua. Los niveles estáticos son bastante someros (3 – 6 m de profundidad) con escasas oscilaciones estacionales. Las transmisividades oscilan los 2500 m²/día, mientras que los coeficientes de almacenamiento son cercanos a 10⁻². Los acuíferos son libres.

La unidad presenta una delgada cubierta (15 a 30 cm) de suelo vegetal limo arcilloso, y se vincularía a deposición fluvial pleistocena del río Maule.

2.2.3.3 Depósitos fluviales

Unidad compuesta por bancos de ripio, normalmente grueso, con frecuentes niveles arenosos, abundantes estructuras lenticulares y estratificación diagonal. Morfológicamente, son llanos que conforman terrazas fluviales. Genéticamente, esta unidad se vincula a depositación holocena.

Los sedimentos de esta unidad se encuentran débilmente compactados y tienen una buena selección, con una buena porosidad secundaria y permeabilidad, lo que genera una buena interconexión hidráulica entre las aguas de los cauces actuales y los acuíferos (libres).

Las condiciones hidrogeológicas son buenas, con niveles acuíferos emplazados en rípios y gravas con arena. Los niveles freáticos se sitúan generalmente cercanos a la superficie, influenciados por la cota del río. Existe además una conexión río – acuífero, la que provoca a veces un descenso de los niveles freáticos en épocas de bajo caudal. Las transmisividades son altas.

2.2.3.4 Depósitos fluviales en cauces actuales

Consiste en rípios, gravas y gravas arenosas, uniformemente distribuidos a todo lo largo y ancho de la actual llanura de inundación de los ríos mayores. Sus márgenes poseen una clara expresión cuando el cauce ha logrado cierta profundización, con desarrollo de terrazas. Genéticamente, la unidad se vincula a procesos de transporte y sedimentación actual.

Constituidos, en su mayoría, por gravas arenosas y frecuentes niveles de arenas limpias, conformando estratos de buena selección y escasa compactación. Los niveles estáticos tienden a concordar con el nivel de aguas superficiales de los cauces actuales. Presentan altas transmisividades y coeficientes de almacenamiento.

2.2.3.5 Depósitos fluviales antiguos del Río Maule

La sección superior del relleno hasta los 85 m de profundidad, consiste, principalmente, en materiales clásticos gruesos (ripios, gravas y gravas arenosas) de probable origen fluvioaluvial, con algunas intercalaciones limoarcillosas. La secuencia basal, entre los 85 y 237 m de profundidad, está integrada por una alternancia de limos y arcillas con importante contenido cinerítico, propio de sedimentación en ambientes con circulación restringida, lacustre a fluviolacustre.

Hacia el oeste, en el flanco norte del río Lircay, los 20 m superiores consisten en depósitos finos (arcillas y arenas) con escasas gravas. En los 30 m basales, la secuencia grada a depósitos de grano más grueso (ripio fino, arena gruesa, con algo de arcillas). En el flanco sur del río Maule, la secuencia contiene, en los 30 m superiores, arenas, gravas con escasos bolones y un 15 - 30 % de arcilla intersticial, mientras que en los 24 m basales dominan bolones, gravas y arenas.

Genéticamente, la unidad sería el resultado de procesos deposicionales ocurridos durante el Pleistoceno inferior.

Presenta transmisividades cercanas a los 200 m²/día y coeficientes de almacenamiento del orden de 10⁻⁴.

3. Resultados

3.1 Hidrogeología

Se compiló una base de datos de niveles estáticos de 178 pozos pertenecientes a la zona de estudio y al área circundante de influencia (Figura 16). El 85% de esta información proviene de expedientes pertenecientes a la DGA y el 15% restante a GCF Ingenieros Ltda. (2010). Tanto para el mapa de cotas hidráulicas como para el de niveles estáticos se utilizó una interpolación del tipo *kriging* ordinario omnidireccional con anisotropía, usando el módulo geoestadístico de ArcMap 10.2. Este método entrega el mejor ajuste de los datos y genera una superficie continua siendo el más indicado para interpolar niveles de aguas subterráneas, ya que reduce el error relativo de la estimación (Yao et al., 2014). Se utilizó la cordillera de la Costa y los cerros isla como condición de borde, ya que corresponden a rocas del basamento y funcionan como barreras para la escorrentía subterránea. El detalle de los pozos utilizados se encuentra en la Tabla 16, Anexo 8.2.1.

3.1.1 Niveles estáticos

Los niveles estáticos corresponden a niveles someros desde los 1.6 metros (pozos surgentes) hasta los 47 metros, en la gran mayoría de los casos pertenecientes a acuíferos muy superficiales. Los casos aislados en que los pozos perforados son surgentes, ocurren cerca de la confluencia de los ríos Claro y Lircay. Estos, se plasman en la Figura 15.

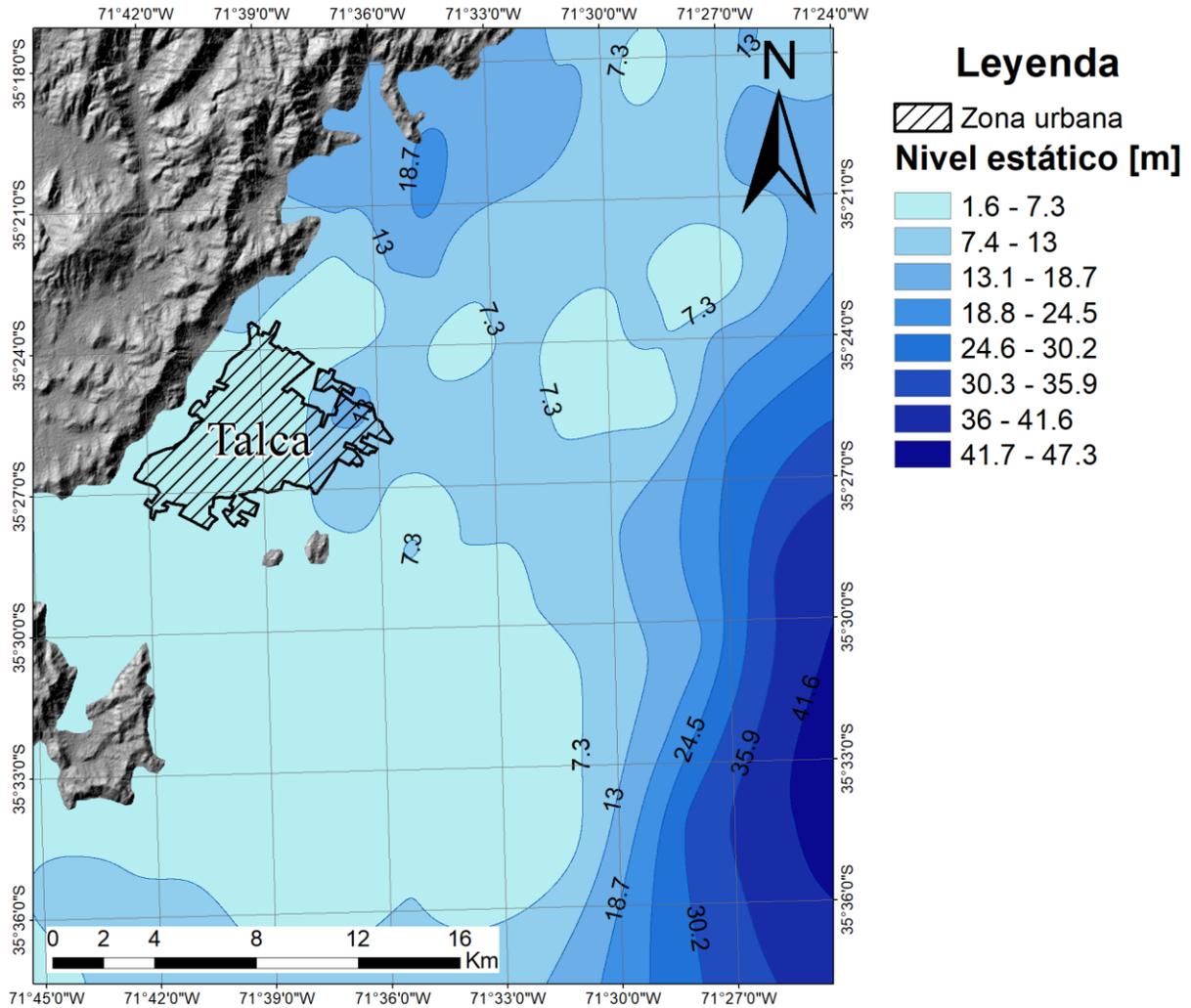


Figura 15: Distribución de niveles estáticos bajo la ciudad de Talca. FUENTE: Elaboración propia.

3.1.2 Cotas hidráulicas

Las cotas hidráulicas (Figura 16) son representadas por isopiezas o líneas equipotenciales, es decir, líneas de igual altura, respecto de una altura referencial (en este caso, nivel del mar). Estas permiten observar que el flujo del agua subterránea es mayormente en dirección NW en la depresión central y SW cerca de la Cordillera de la costa. Se encuentra fuertemente controlado por la topografía.

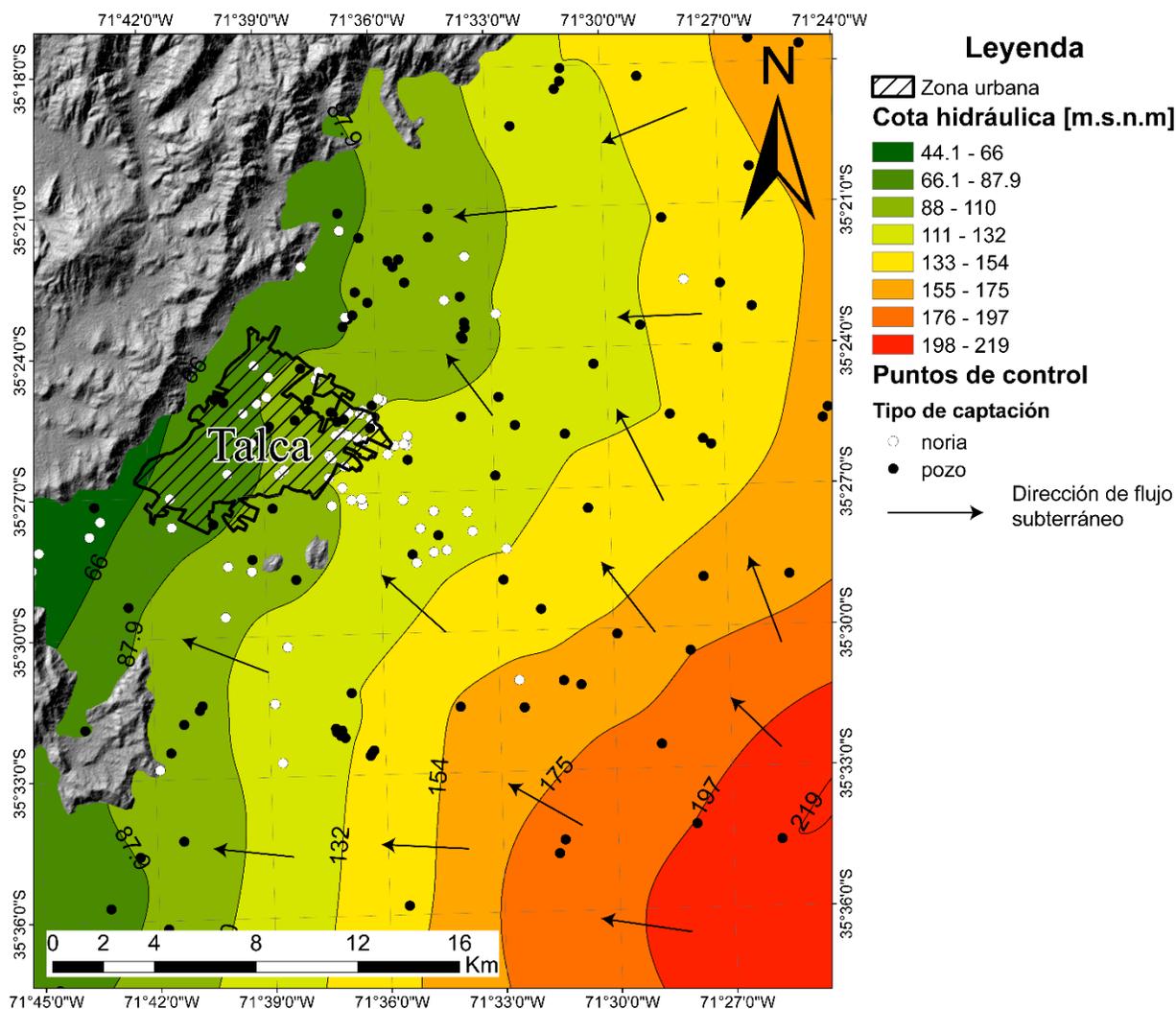


Figura 16: Cotas hidráulicas en la zona circundante a Talca. Se observan además los puntos de control utilizados en este estudio y las direcciones de flujo subterráneo, perpendiculares a las isopiezas. FUENTE: Elaboración propia.

3.2 Estratigrafía

Se generaron 2 perfiles estratigráficos (Figura 17) basándose en información de pozos compilada por Alfaro (2011). El detalle puede ser examinado en el Anexo 8.2.4.1.

Se observa en ambos perfiles que la unidad predominante son las gravas y gravas en matriz de arena, seguidas por arenas y suelos arenosos en matrices limoarcillosas. Existen lentes locales de arcillas de pocos metros de espesor. Los niveles cineríticos se ven restringidos a pocas zonas, sin demasiada continuidad lateral.

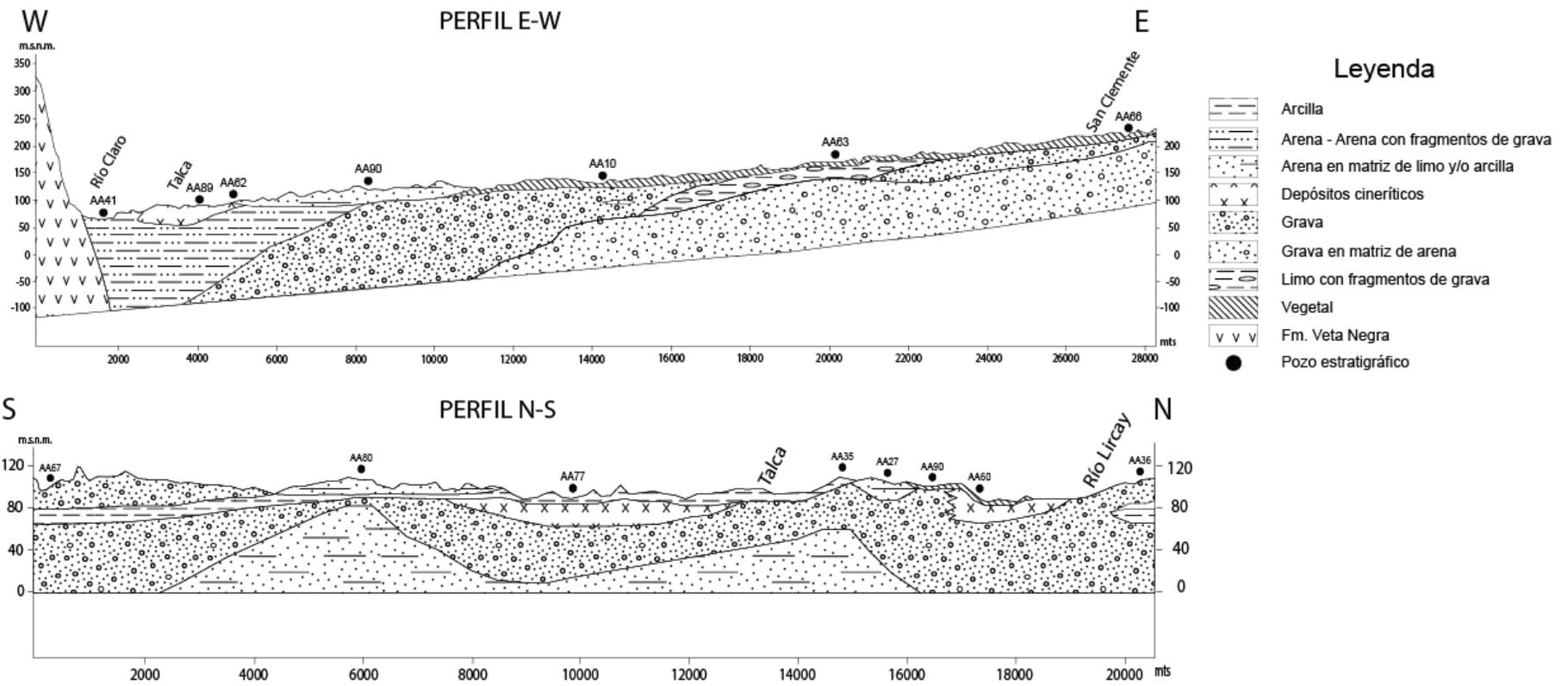


Figura 17: Perfiles estratigráficos de la zona de estudio. Ubicación en Figura 12. FUENTE: Elaboración propia

3.3 Oferta térmica

3.3.1 Coefficient of performance (COP)

El coeficiente de rendimiento (COP, por sus siglas en inglés) se refiere a la razón obtenida entre el calentamiento que proporciona una bomba de calor (Q_{TOTAL}) y la electricidad consumida para generarlo (W_{TOTAL}), energía que en gran parte es utilizada por el compresor de la bomba (Ecuación 1). El COP depende directamente de la diferencia entre las temperaturas entre la fuente de calor y el área a calentar. En una bomba de calor el COP es mayor a 1, ya que, básicamente, se está utilizando energía para “mover” el calor desde un lugar (sedimentos, agua subterránea) hacia otro (casa). Por ejemplo, una bomba de calor funcionando bajo un COP teórico de 4 genera 4 unidades de calor (Q_{TOTAL}) por cada 1 unidad de energía eléctrica suministrada. La fuente pierde, entonces, 3 unidades de calor. En términos de eficiencia y temperaturas, el COP se calcula usando la eficiencia de Carnot (ε_c) y un factor de aproximación (α) que es un parámetro de operación de la bomba.

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

$$Q_{TOTAL} = Q_{SUELO} + W_{TOTAL} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$COP = \alpha \varepsilon_c \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\varepsilon_c = \frac{T_{hot}}{T_{hot} - T_{cold}} \quad \text{Ecuación 4}$$

La eficiencia de Carnot es función de las temperaturas absolutas de punto caliente (lugar a calentar, T_{hot}) y punto frío (fuente de calor, T_{cold}). La temperatura de punto caliente corresponde a la del condensador de la bomba de calor y la temperatura de punto frío es la del evaporador de la bomba de calor. Mientras menor sea esta diferencia de temperaturas, la eficiencia será mayor, tendiendo a infinito cuando el ΔT° tiende a cero (Figura 18).

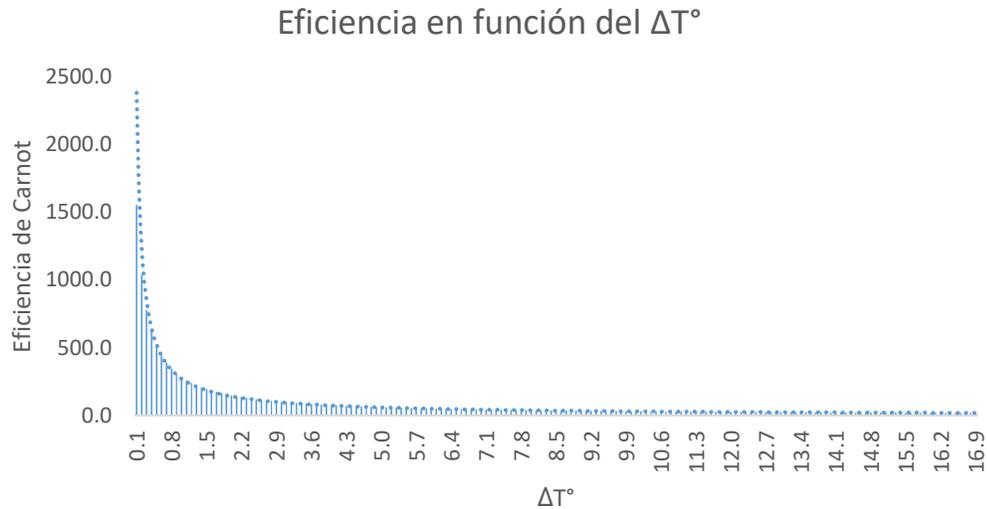


Figura 18: Variación de la eficiencia de Carnot en función de la diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida del evaporador.

En la literatura se consideran valores aceptables de COP entre 3 y 5 (Muñoz 2015, Gaínza 2014), con soluciones existentes en el mercado que operan bajo un COP de 4, siendo este el valor más comúnmente obtenido al sopesar las variables de temperatura y eficiencia.

Se estimarán valores de COP para el sistema horizontal cerrado y para el vertical abierto. Estos valores varían principalmente en el *input* de temperatura de la fuente fría.

3.3.2 Intercambiadores horizontales cerrados

En este caso se debe estimar la temperatura del subsuelo a una cierta profundidad con el fin de calcular el coeficiente de rendimiento. Esta profundidad ha sido establecida en 1.5 m luego de revisar diversos trabajos en que usan 1.45 m (Maripangui et al., 2016) y 1.7 m (Todoran & Balan, 2016).

Dado que no se tienen datos de temperatura en profundidad a 1.5 m de la superficie, se utilizará un método para estimarla. Dicho método ha sido postulado por Kusuda (1965) y supone un suelo homogéneo con propiedades térmicas constantes.

Es sabido que los ciclos de temperaturas mensuales medias varían, tanto en la superficie como en profundidad, siguiendo un patrón que puede ser ajustado a una función armónica simple (Andújar et al., 2016). La temperatura en profundidades cercanas a la superficie se ve afectada, principalmente, por agentes atmosféricos y por la radiación solar. Dependiendo de las propiedades físicas como humedad, compactación, litología, entre otras, esta temperatura será transferida con mayor o menor desfase hacia abajo con respecto a la temperatura ambiente, alcanzando un equilibrio a partir de los 5 metros, aproximadamente, observándose una curva “embudo” (Figura 19. ATECYR, 2012).

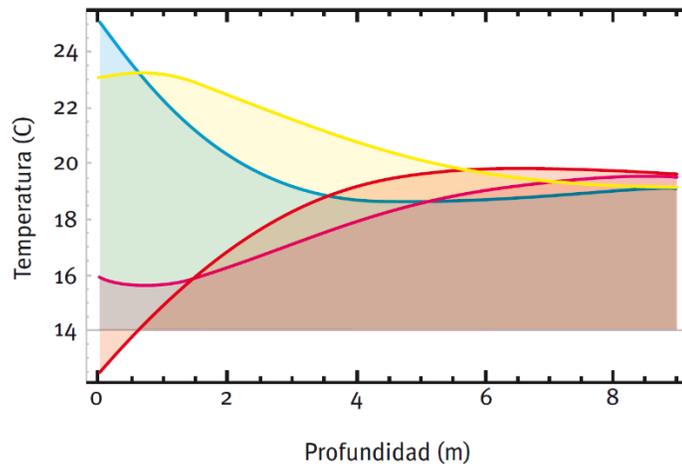


Figura 19: Evolución de la temperatura del suelo. Los colores indican las distribuciones de temperatura para diferentes días a lo largo del año. FUENTE: ATECYR, 2012.

La ecuación que permite conocer la temperatura en profundidad es la siguiente:

$$T_{suelo}(z, t) = T_m - T_p e^{-z\sqrt{\frac{w}{2\alpha}}} \cos\left(wt - \varphi - z\sqrt{\frac{w}{2\alpha}}\right) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

- T_m = Temperatura promedio anual del aire [°C].
- T_p = Amplitud [°C]. Corresponde a la semidiferencia entre la máxima y la mínima temperatura anuales.
- t = Coordenadas temporales [s]. Comenzando desde el 1 de enero a las 00:00.
- w = Frecuencia angular [rad/s]. La tasa de cambio de la función, con $w = 2\pi/T$, donde T es el período de la senoide, $T = 365.24 \times 24 \times 3600 = 3.1557 \times 10^7$ s.
- φ = Fase [rad]. Representa el desfase entre la variación de la T° del aire y la T° del suelo a una profundidad z .
- α = Difusividad térmica del suelo [$m^2/día$]. Se calcula a partir de la densidad, la conductividad térmica y el calor específico del suelo.

La dificultad en la estimación de la difusividad radica en el hecho de que las propiedades físicas tanto intrínsecas como extrínsecas del suelo varían en un amplio rango. Valores de difusividad usados frecuentemente (Andújar et al., 2016) están en el rango de 0.02678 y 0.06480 [$m^2/día$] para gravas secas y saturadas respectivamente; estos valores fluctúan entre 0.02938 y 0.14861 [$m^2/día$] para arenas secas y saturadas respectivamente. En esta estimación se utilizará un valor promedio de 0.04817 [$m^2/día$], ya que el relleno sedimentario corresponde principalmente a gravas en matrices arenosas con mayor o menor cantidad de agua.

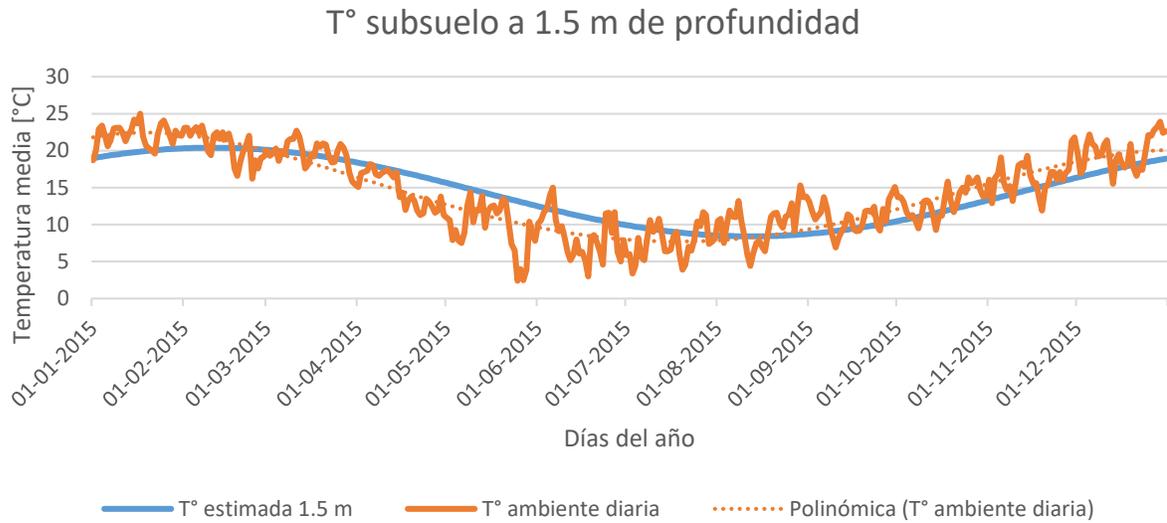


Figura 20: Fluctuación estimada de la temperatura en el subsuelo a 1.5 metros de profundidad en el año 2015. FUENTE: Elaboración propia.

En la Figura 20 se observan las fluctuaciones diarias de la temperatura ambiente en la estación “Talca U.C.” (Explorador CR2, 2016). A partir de estos datos se estimó la temperatura en el subsuelo a 1.5 metros de profundidad, utilizando una fase de 35 días correspondiente a la inercia térmica del suelo (ATECYR, 2012). El COP ha sido estimado a partir de esta temperatura (Figura 21). Este, fluctúa entre 3.5 y 4.7, con un promedio anual de 4.1, el cual se acerca al citado anteriormente. El factor de aproximación (α) fue establecido en 0.5, como lo sugieren De Swardt & Meyer (2001).

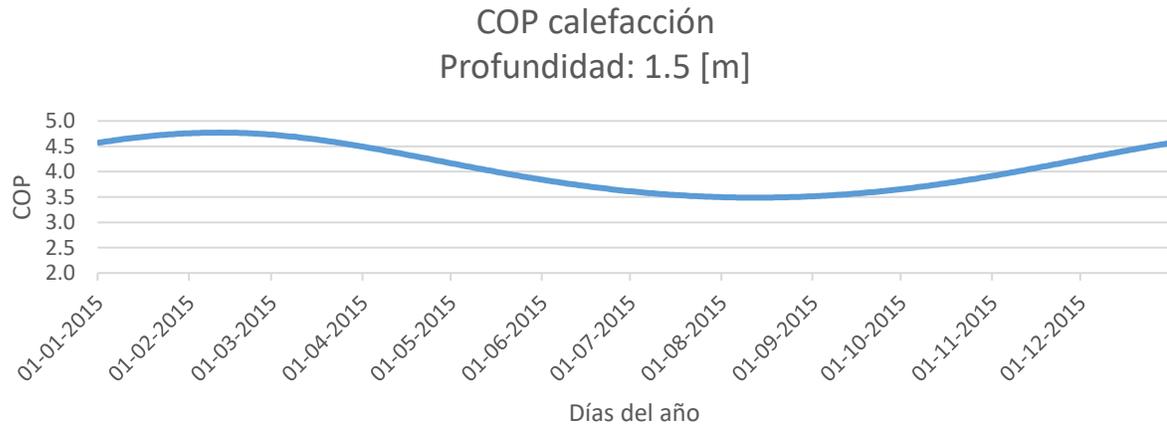


Figura 21: COP real anual estimado para el relleno sedimentario de la ciudad de Talca. FUENTE: Elaboración propia.

3.3.2.1 Análisis de sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad de la estimación de Kusuda con respecto a la profundidad de los colectores (Figura 22) y a los días del año (Figura 24). Se observa que a mayor profundidad la variación se hace menor, alcanzándose una estabilización del COP entre los 10 y 15 metros, con un valor prácticamente igual a 4, lo que también se puede observar en la Figura 24.

La variabilidad del COP durante el día más frío del año, con una T° ambiente de $2.4 [^\circ\text{C}]$, se ilustra en la Figura 23. Se desprende que existe una variación de hasta un 2% en los promedios del COP, mientras que los COP mínimos varían hasta un 7.7%.

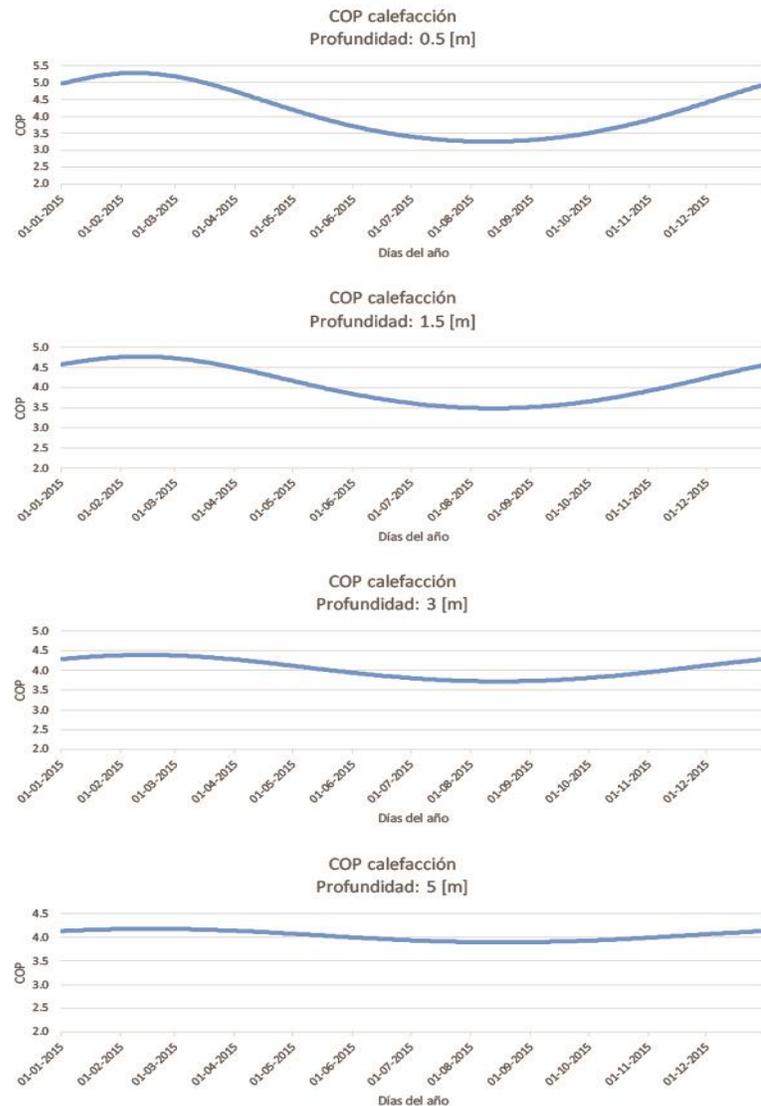


Figura 22: Análisis de sensibilidad de la estimación de la temperatura con respecto a la profundidad. Se observa una estabilización progresiva de la temperatura conforme aumenta la profundidad. FUENTE: Elaboración propia.

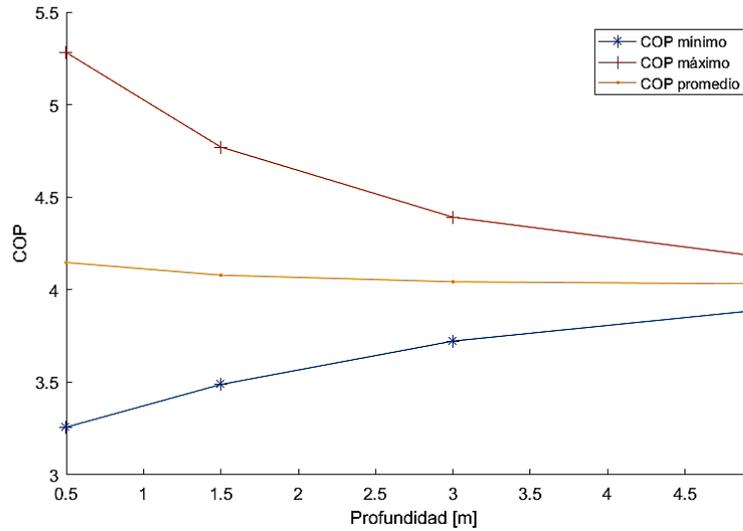


Figura 23: Variabilidad del COP según la profundidad para el día medido más frío del año. FUENTE: Elaboración propia.

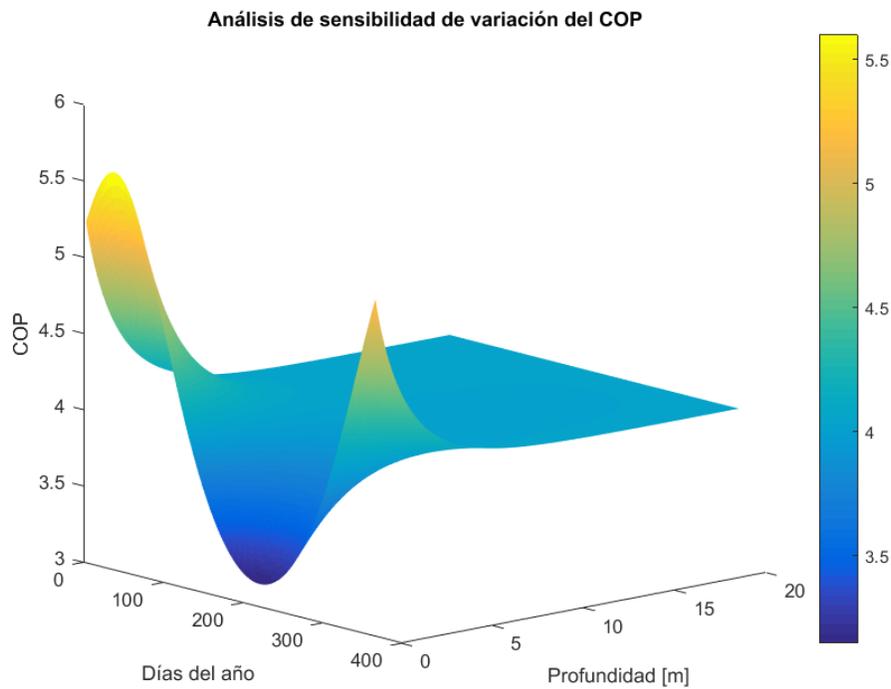


Figura 24: Análisis de sensibilidad de la variación del COP con respecto a los días del año y a la profundidad. FUENTE: Elaboración propia.

3.3.3 Intercambiadores verticales abiertos

En el caso de los intercambiadores verticales abiertos se debe considerar una perforación que, al menos, alcance el nivel estático. Una vez alcanzado el nivel estático se debe asegurar una profundidad de seguridad dictada, principalmente, por el abatimiento

provocado por el bombeo. El diseño debe hacerse considerando 2 pozos: uno de extracción y otro de reinyección. Esto implica que el derecho solicitado a la DGA es del tipo no consuntivo.

Para la estimación del potencial se debe considerar:

1. La temperatura estabilizada del agua en profundidad.
2. La capacidad de extracción del pozo (caudal), dada por la transmisividad.

3.3.3.1 Temperatura de las aguas subterráneas

Usando el método de *kriging* ordinario omnidireccional con anisotropía, en Arcgis 10.2, se generó un mapa de temperaturas del agua subterránea. La temperatura interpolada corresponde a aquella que se ha estabilizado en profundidad, es decir, donde el perfil de temperatura se estabiliza hasta hacerse constante. Como ejemplo, en la Figura 25 se observa en un pozo con un nivel estático de 3 metros cómo la temperatura del agua se estabiliza en 18.9°C después de los 30 metros, aproximadamente.

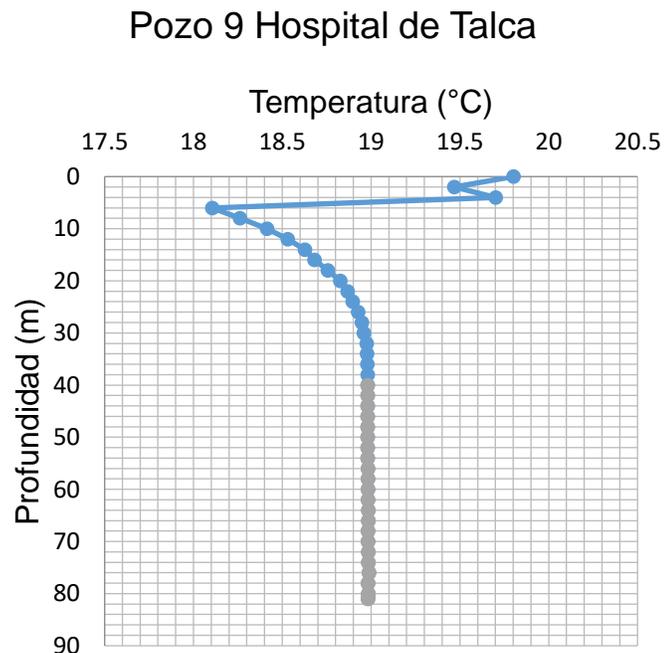


Figura 25: Perfil de temperatura de un pozo ubicado en el Hospital de Talca. El nivel estático se encuentra a 3 metros de profundidad. FUENTE: Muñoz (2016).

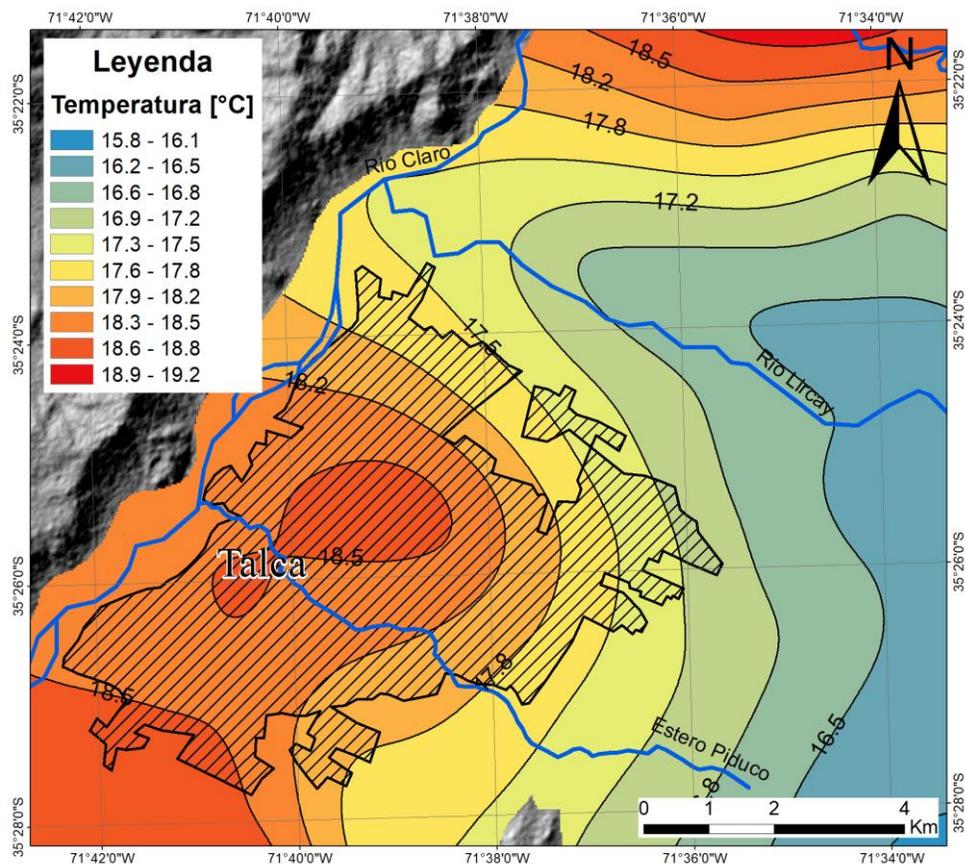


Figura 26: Temperatura del agua subterránea interpolada usando *kriging* ordinario omnidireccional con anisotropía. FUENTE: Elaboración propia.

Las temperaturas varían, bajo la ciudad, entre 16.8 y 18.1 °C (Figura 26). Se observa que existe un efecto de isla térmica bajo la ciudad de Talca, el cual ha sido descrito por Zhu et al. (2010) como un efecto colateral de la urbanización. La temperatura bajo el núcleo de la ciudad es al menos 1°C mayor que en las inmediaciones. Además, se observa que el Río Lircay perturba la isoterma, ejerciendo un “arrastre” de esta hacia el NW.

Con el fin de estimar el COP de la bomba para este sistema, se utilizó el módulo *Raster Calculator* de *Spatial Analyst* en Arcgis 10.2 para generar un ráster. El factor de aproximación a usar será de 0.5. La temperatura de punto frío se ha calculado con un $\Delta T = 2$ [°C]. Este ΔT es la mínima diferencia de temperatura que debe existir entre el agua del acuífero y el intercambiador de la bomba. Este cálculo corresponde al de un intercambiador de placas empacadas, PHE por sus siglas en inglés⁷, el cual se encuentra en la mayoría de los equipos existentes actualmente. Si bien, la mínima diferencia de temperatura de este tipo de intercambiador es 1°C, se usarán 2°C para mayor seguridad (González - Mendizabal, 2000). El resultado para el COP se presenta en la Figura 27.

⁷ Plate heat exchanger.

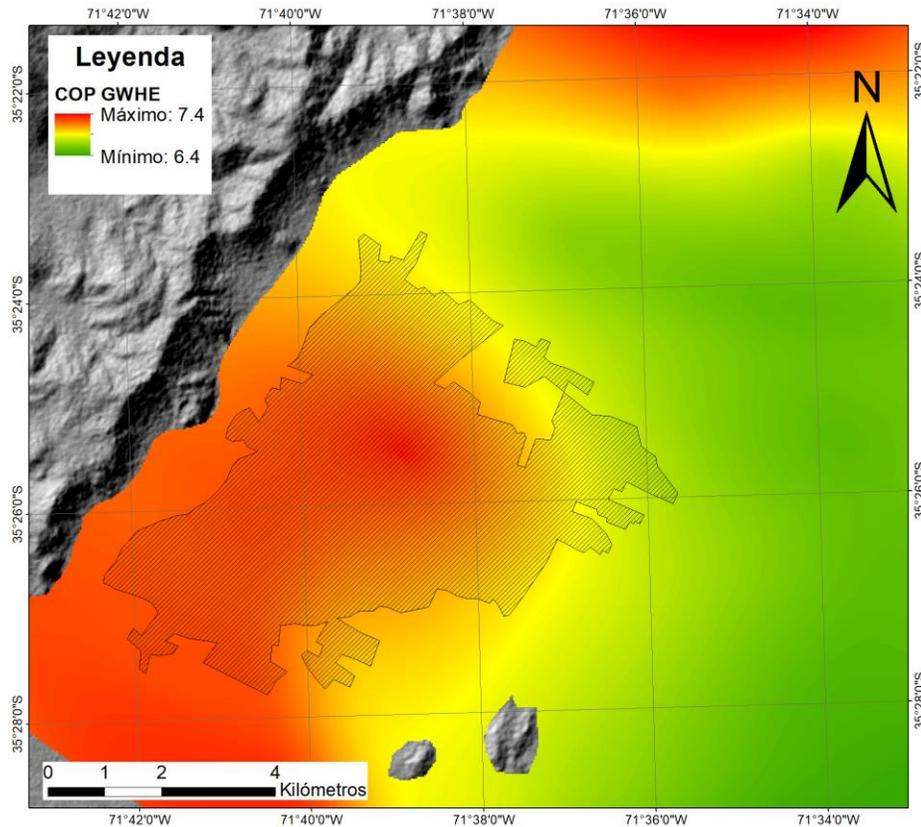


Figura 27: COP de la bomba de calor en un sistema vertical abierto. Los valores fluctúan entre 6.4 y 7.4 usando un factor de aproximación de 0.5 y un ΔT de 2 [°C]. FUENTE: Elaboración propia.

3.3.3.2 Capacidad de extracción

3.3.3.2.1 Parámetros elásticos

La capacidad de extracción de agua desde el acuífero ha sido dimensionada mediante pruebas de bombeo realizadas sobre pozos seleccionados con registros en la DGA. Se compiló una base de datos usando pruebas de bombeo propias (27/60) y pertenecientes a un documento de la DGA (33/60), realizado por GCF Ingenieros (2010).

Se estimaron los valores de transmisividad usando exclusivamente pruebas de recuperación luego de bombeos de descarga constante de largo aliento de al menos 24 horas (1440 minutos) mediante el método de recuperación de Theis. El método de recuperación resulta ser más confiable que datos obtenidos durante el bombeo, ya que recoge valores del abatimiento residual, el que corresponde al incremento del nivel dinámico una vez detenido el bombeo. El abatimiento residual ocurre, a diferencia del abatimiento en descarga fija, a una tasa constante (Waterloo Hydrogeologic, 2016). Las transmisividades compiladas se resumen en la Figura 28, mientras que en la Figura 29 se muestran las permeabilidades obtenidas.

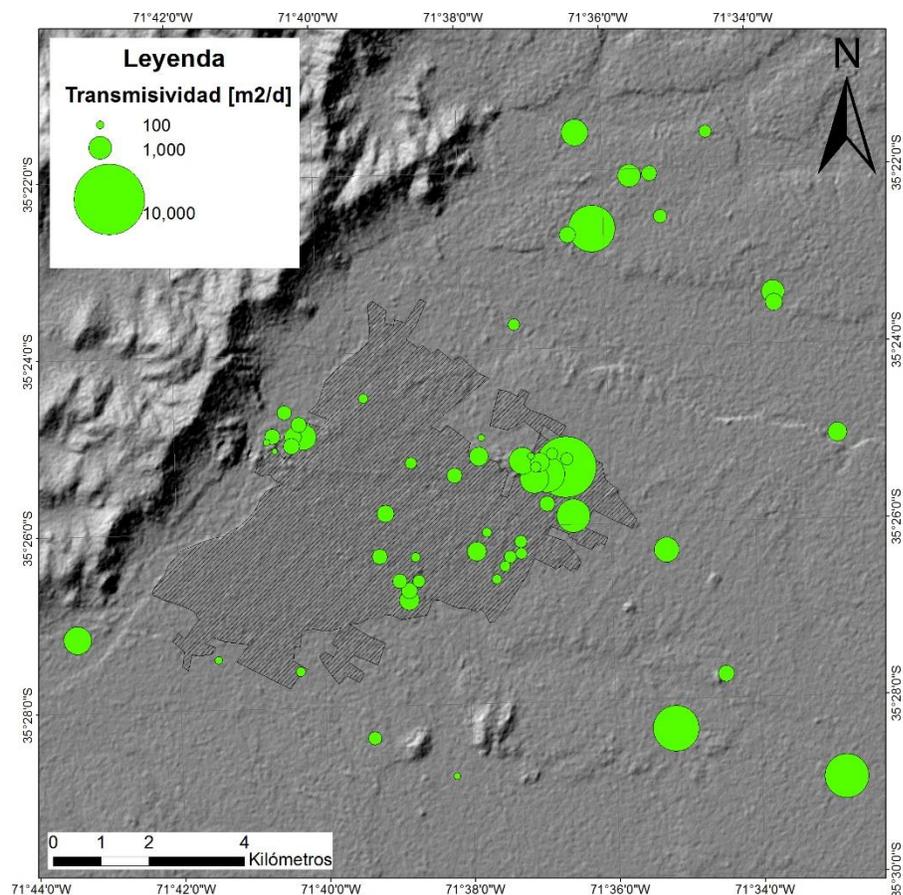


Figura 28: Valores de transmissividade obtidos de pruebas de bombeo y de GCF Ingenieros (2010). FUENTE: Elaboración propia.

Los valores de conductividad hidráulica obtenidos se encuentran en su mayoría entre 10^{-4} y 10^{-3} [m/s]. Según Custodio & Llamas (1983), estas conductividades corresponden a las de gravas y arenas o arenas gruesas, las que clasifican hidrogeológicamente como un buen acuífero. Marsily (1986) reporta valores similares (Tabla 3) a los de Custodio & Llamas. Estas se resumen en la Figura 29.

Medio	K (m/s)
Grava gruesa	$10^{-1} - 10^{-2}$
Arena y grava	$10^{-1} - 10^{-5}$
Arena fina, limo, limolita	$10^{-5} - 10^{-9}$
Arcilla, esquisto, sedimento glacial	$10^{-9} - 10^{-13}$

Tabla 3: Conductividades hidráulicas medias para diferentes medios no consolidados. FUENTE: Marsily (1986).

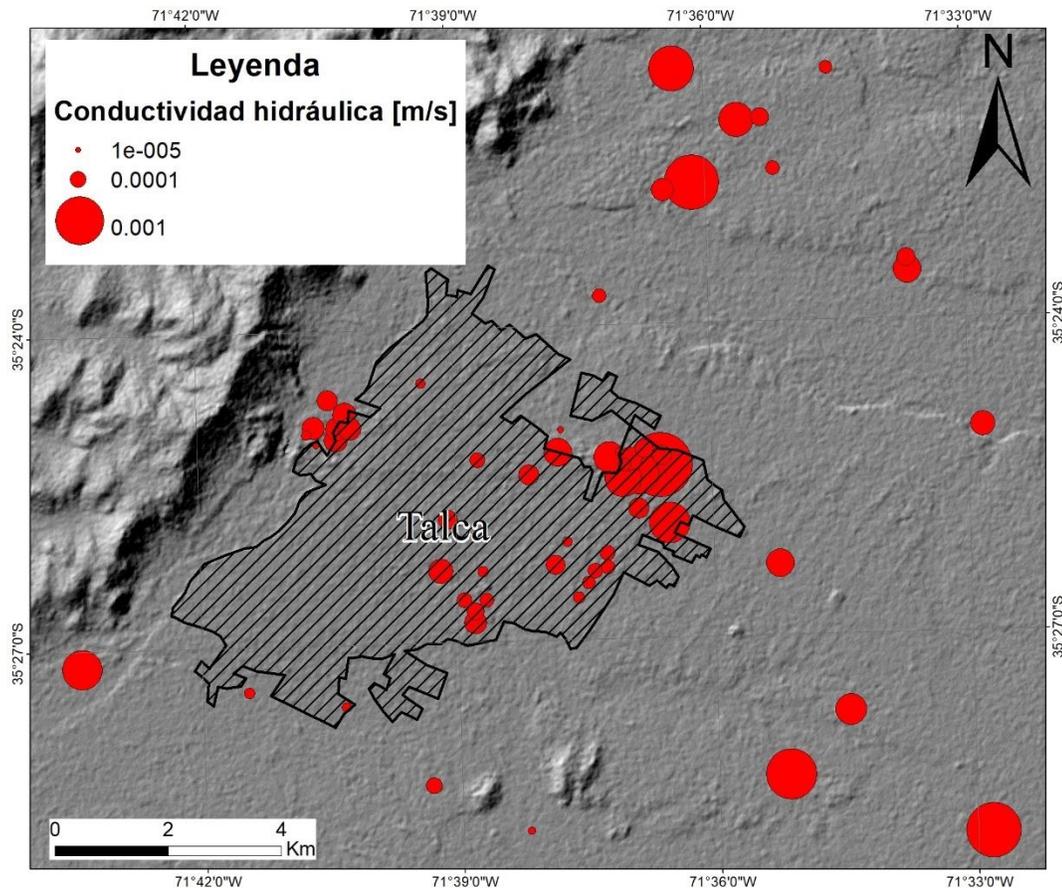


Figura 29: Conductividades hidráulicas en [m/s] de los sedimentos en la zona de estudio. La mínima corresponde a 1.4×10^{-5} m/s, mientras que la máxima a 1.8×10^{-3} m/s. FUENTE: Elaboración propia.

3.3.3.2.2 Caudales

Usando una base de datos compilada a partir de 88 derechos de agua consuntivos otorgados por la DGA en la comuna de Talca se revisaron los caudales aprobados y se generó un gráfico de porcentajes acumulativos, con el fin de estudiar los percentiles. Se ajustó esta curva a una polinómica de orden 6 con $R^2 = 0.9929$, la que se ilustra en la Figura 30. Con esta curva se considerarán 3 escenarios más o menos favorables en función del caudal concedido, los cuales se resumen en la Tabla 4; esto implica que un caudal mayor será más favorable, pero menos probable y viceversa.

Porcentaje acumulado de caudal

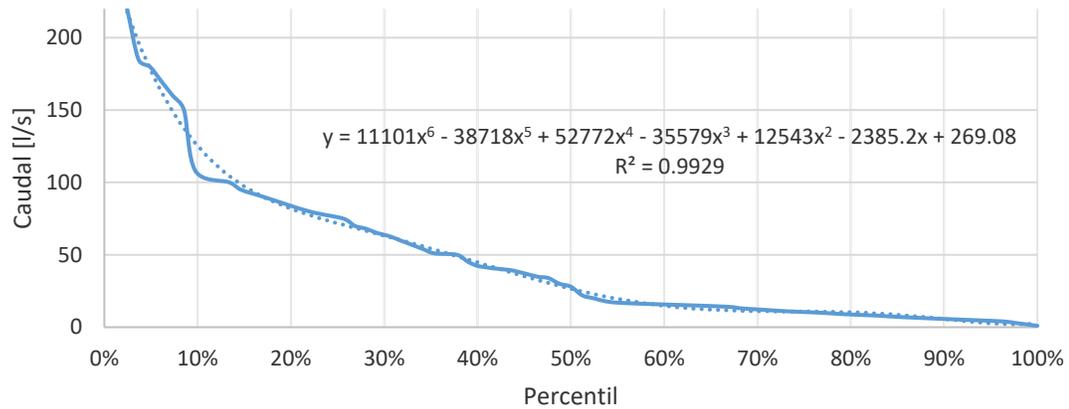


Figura 30: Porcentajes acumulados de los caudales otorgados por la DGA en la zona de estudio. FUENTE: Elaboración propia.

Para obtener la cantidad de calor extraíble con un caudal de Q [l/s] se deben considerar las propiedades físicas del agua y la diferencia de temperatura entre el agua que entra y la que sale del circuito de la bomba de calor. Esta diferencia ha sido establecida en 5 [K] (Muñoz et al., 2015), aunque hay autores más conservadores que utilizan un valor de 3 [K] (Arola et al., 2014). La ecuación utilizada es la siguiente (Arola et al., 2014):

$$Q_{SUELO} = Q \cdot \Delta T \cdot C_p \cdot \rho \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

- Q_{SUELO} = Energía extraíble desde un caudal de agua [W].
- Q = Caudal extraído desde un pozo [l/s].
- ΔT = Diferencia de temperatura entre la entrada y la salida de la bomba de calor [K].
- C_p = Capacidad calorífica del agua [J/kg K].
- ρ = Densidad del agua a 4 [°C]. Tiene unidades de [kg/l].

Caso	Percentil	Caudal (Q) [l/s]	Potencia extraíble (Q_{SUELO}) [kW]
Menos probable	50%	27	567
Probable	75%	11	231
Más probable	90%	6	126

Tabla 4: Caudales concedidos por la DGA en Talca y la potencia a extraer a partir de Arola et al. (2014).

3.3.3.2.3 Abatimiento

El abatimiento se define como aquel descenso en el nivel del espejo de agua provocado por el bombeo sostenido en el tiempo.

Para cuantificarse, se han utilizado 75 pozos con información de pruebas de bombeo, procedentes del Centro de Recursos hídricos de la DGA. Dichos puntos cuentan con pruebas de largo aliento de 24 horas a caudal constante, con gastos entre 2 y 220 [l/s]. Los abatimientos, por otra parte, varían entre 1 y 33 metros. El detalle de los pozos y sus respectivos abatimientos, se adjunta en el Anexo 8.2.3. En la Figura 31 se grafican los abatimientos asociados a cierto caudal. Se observa que hacia el este de la ciudad estos son, en general, menores a 7 metros, aún con caudales de extracción altos. Hacia la ciudad se dan depresiones mayores, de hasta 33 metros, mientras que hacia el noreste los abatimientos son más bien intermedios, de entre 7 y 17 metros.

En la Tabla 5 se detallan los abatimientos máximos asociados a los casos planteados en la sección anterior. En todos los casos existen abatimientos muy bajos, por lo que éste no depende directamente del caudal extraído.

Caso	Percentil	Caudal [l/s]	Abatimiento [m]	
Menos probable	50%	27	desde 2 m.	hasta 33 m.
Probable	75%	11	desde 1 m.	hasta 31 m.
Más probable	90%	6	desde 1 m.	hasta 31 m.

Tabla 5: Cota superior de los abatimientos provocados por un bombeo a caudal constante por 24 horas. FUENTE: Elaboración propia.

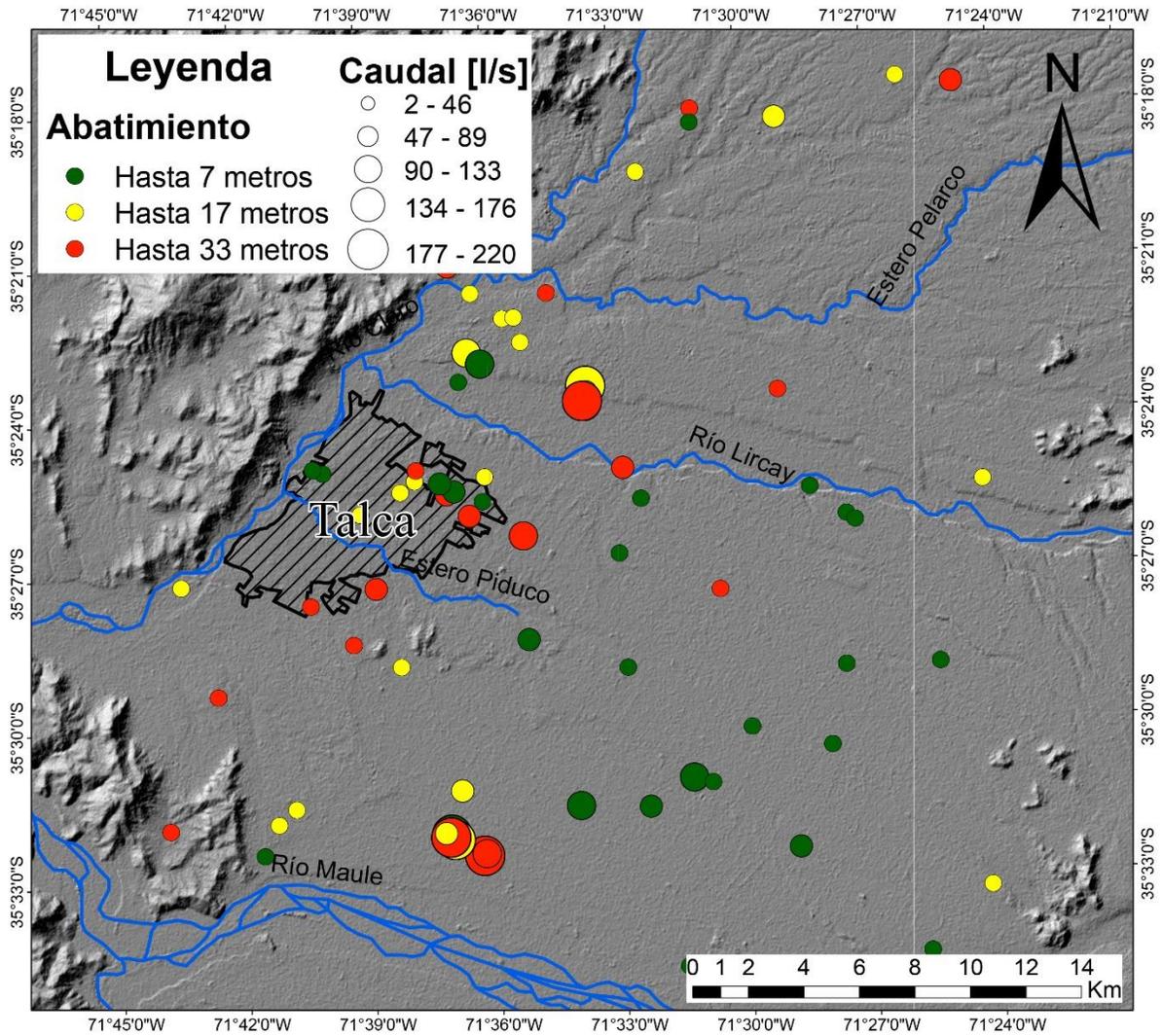


Figura 31: Abatimientos provocados por un bombeo constante durante 24 horas. FUENTE: Elaboración propia con datos del Centro de Recursos Hídricos, DGA.

3.3.3.2.4 Potencia total

La potencia total será la suma entre la potencia térmica entregada por el agua subterránea y la añadida por el suministro eléctrico de la bomba de calor (Ecuación 2). Si se reemplaza la Ecuación 1 en la Ecuación 2 se tiene lo siguiente:

$$Q_{TOTAL} = Q_{SUELO} \cdot \left(\frac{COP}{COP - 1} \right) \quad \text{Ecuación 7}$$

Usando la Ecuación 7 se obtiene que la potencia total extraíble (Q_{TOTAL}) fluctúa entre 146 y 148 [kW] para un caudal considerado poco favorable en la región, el que corresponde a 6 [l/s] (Tabla 4).

3.3.4 Intercambiadores verticales cerrados

Con la finalidad de estimar el potencial para intercambiadores verticales cerrados, se debe conocer con mayor o menor precisión la estratigrafía existente en el lugar de perforación. De esta manera se puede conocer la tasa específica de extracción de calor de cierto pozo. Este es un parámetro conocido como sHE⁸, el cual se encuentra tabulado para diferentes tipos de sedimento según la norma alemana VDI4640 (año 2001, Tabla 6). Esta norma considera un intercambiador vertical cerrado doble en forma de U (Figura 32) funcionando 100 días al año (2400 horas). Para el caso de estudio se considerará, en ciertos pozos, desde el nivel estático hacia abajo, un alto flujo subterráneo. Esto se explica con mayor detalle en la sección 3.3.4.1.

Tipo de sedimento	sHE [W/m]	sHE a usar [W/m]
Grava/arena seca	20	20
Grava/arena saturada	55 - 65	60
Grava/arena con alto flujo subterráneo	80 - 100	90
Arcilla/limo	30 - 40	35

Tabla 6: Valores tabulados seleccionados de sHE para diferentes tipos de sedimento. FUENTE: Quaschnin (2016).

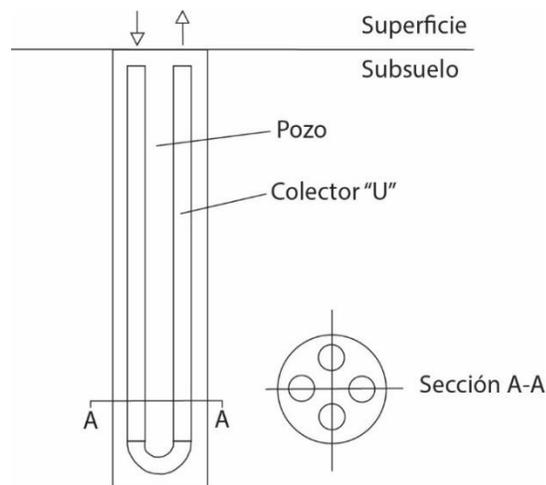


Figura 32: Colector vertical cerrado doble en forma de U. FUENTE: Elaboración propia.

Para cada pozo con estratigrafía se calculará un valor promedio de sHE dado por la Ecuación 8, propuesta por Gemelli (2011).

⁸ *Specific heat extraction*; sHE por sus siglas en inglés.

$$sHE_{prom} = \frac{1}{h_{TOTAL}} \sum_{i=1}^n sHE_i \cdot h_i \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

- sHE_{prom} = sHE promedio del pozo [W/m]
- h_{TOTAL} = profundidad total del pozo [m]
- sHE_i = sHE de la i-ésima capa estratigráfica [W/m]
- h_i = espesor de la i-ésima capa [m]

3.3.4.1 Flujo subterráneo

Una buena aproximación para conocer la velocidad del agua subterránea en un régimen permeable puede obtenerse con la velocidad de Darcy (Ecuación 9).

$$V_{DARCY} = k \cdot i \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

- V_{DARCY} = Velocidad de Darcy [m/s]
- k = Conductividad hidráulica [m/s]
- i = Gradiente hidráulico [adimensional]

El gradiente hidráulico ha sido calculado mediante la función *Slope* en el módulo *Spatial Analyst* de Arcgis, a partir del mapa de cotas hidráulicas obtenido mediante *kriging* (Figura 41, Anexo 8.5). Al ráster de cotas hidráulicas se le aplicó un filtro pasa bajo utilizando la función *Filter (low)* del módulo *Spatial Analyst* con el fin de remover “escarpes” propios de la interpolación. Este filtro actúa como media móvil, trabajando sobre una vecindad de 3x3 celdas. De esta manera, se evitan pendientes locales de 90° (verticales).

La velocidad real del agua, o velocidad de campo, viene dada como función de la velocidad de Darcy y la porosidad efectiva del medio por el que circula (Ecuación 10). La porosidad efectiva es la razón entre el volumen de espacios vacíos y el volumen total de determinada muestra. Este valor es meramente estimativo y ha sido obtenido en laboratorio en condiciones específicas, por lo que debe tratarse con precaución (Tabla 7).

$$V_{REAL} = \frac{V_{DARCY}}{P_e} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

- V_{REAL} = Velocidad real a la que circula el agua en el acuífero [m/s].
- P_e = Porosidad efectiva del medio [adimensional].

Tipo de sedimento	Máxima	Mínima	Media
Arcilla arenosa	0.18	0.03	0.07
Arena fina	0.28	0.1	0.21
Arena media	0.32	0.15	0.26
Arena gruesa	0.35	0.2	0.27
Arena con grava	0.35	0.2	0.25
Grava fina	0.35	0.21	0.25
Grava media	0.26	0.13	0.23
Grava gruesa	0.26	0.12	0.22

Tabla 7: Porosidad efectiva para diferentes tipos de sedimento. Fuente: Custodio & Llamas (1983).

Para este estudio se utilizará una permeabilidad efectiva de 0.25, la que corresponde a arena con gravas. Los pozos cuya velocidad de flujo sea mayor a 20 [cm/d] serán considerados como sedimentos con un alto flujo subterráneo. Este valor ha sido sugerido a partir de Angelotti et al. (2014), donde concluyen que una velocidad de un par de decenas de centímetros al día puede provocar un aumento en el rendimiento de hasta un 100% del intercambio de calor.

3.3.4.2 Potencial geotérmico

Se ha utilizado un total de 58 pozos con estratigrafía, de los cuales 48 presentan un alto flujo subterráneo ($V_{real} > 20$ [cm/día]). Los resultados se presentan en la forma de una interpolación hecha mediante *kriging* ordinario omnidireccional con anisotropía en la Figura 33.

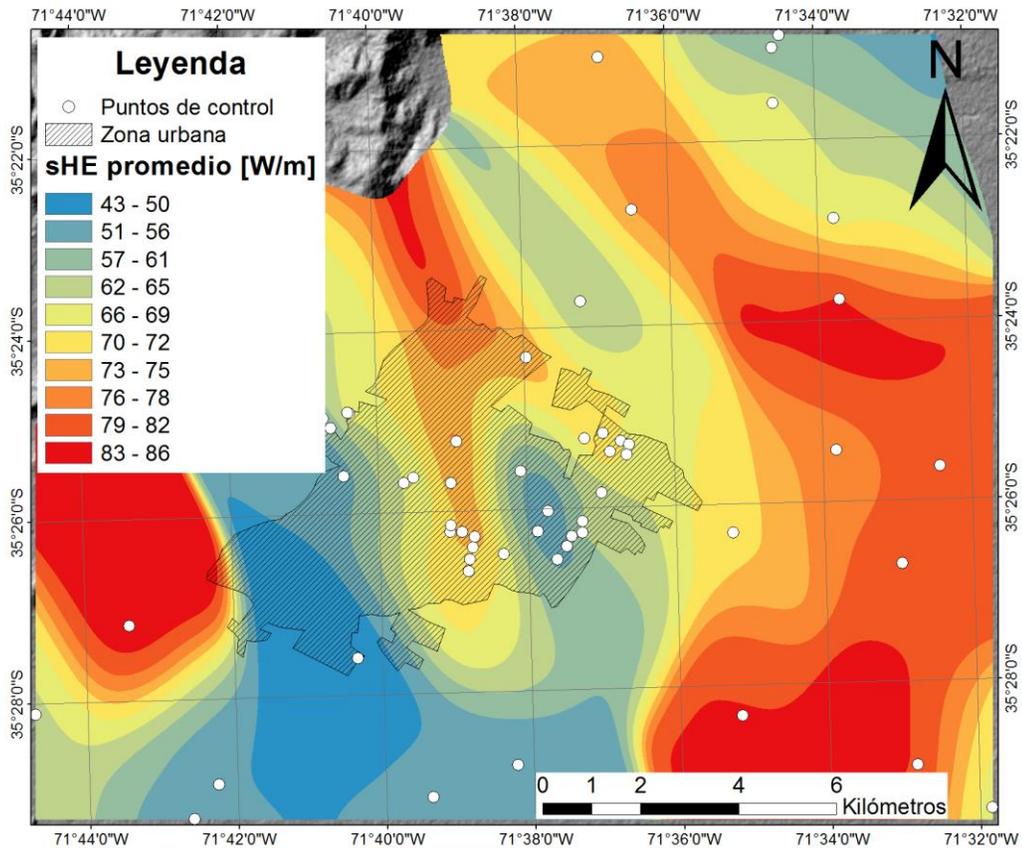


Figura 33: Interpolación de los valores puntuales de sHE realizados sobre 58 pozos con información estratigráfica. FUENTE: Elaboración propia.

3.4 Sistemas de información geográfica

3.4.1 Plan regulador

El plan regulador comunal (PRC) de una ciudad es el instrumento que permite, de acuerdo a la Ley general de urbanismo y construcción, establecer diversas disposiciones relativas a los usos de suelo, zonificaciones, localizaciones del equipamiento comunitario, entre otras funciones. Son definidos por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo y ratificados mediante ordenanzas municipales en cada comuna donde se apliquen (Municipalidad de Talca, 2011). Talca tiene un plan regulador vigente desde el año 2011 que se divide en 3 grupos principales:

1. Áreas urbanas (Figura 34)
2. Áreas restringidas al desarrollo urbano
3. Zonas de conservación histórica

El presente trabajo se enfoca solamente en el primer grupo, el cual comprende 22 subgrupos (Anexo 8.1), donde se definen normas básicas de edificación según su ubicación geográfica. El segundo grupo, que no se tomará en cuenta para este estudio, comprende zonas de peligro geológico tales como lugares potencialmente inundables, cauces naturales y quebradas con riesgo de avalanchas de roca en los que no es posible

erigir viviendas. El tercer grupo son puntos específicos dentro de la ciudad que tampoco serán considerados, ya que se trata de lugares y no zonas. La calidad del presente plan regulador comunal es bastante deficiente, ya que en general no se respetan los mandatos de superficie predial mínima y el detalle del mismo es bajo. Además de esto, los polígonos definidos en la ordenanza se encuentran distribuidos de forma poco consistente con los edificios actualmente construidos, existiendo zonas mal definidas en términos de construcciones previas, pues prácticamente todas las construcciones son previas al año 2011 (Figura 34).

Dado que los sistemas a estudiar tienen diferentes consideraciones espaciales, se debe tomar en cuenta en el momento de estimar la conveniencia de uno u otro sistema. En particular, los sistemas horizontales cerrados ocupan un área mucho mayor que uno vertical, además de que la potencia generada es órdenes de magnitud menor. Para efectos de este estudio, se asume que los predios pertenecientes a cierta zona urbana tienen la superficie mínima admisible por el plan regulador en esa zona. El cálculo de esta superficie se detalla en la Ecuación 11.

$$\text{Área primer piso} = C_o \cdot Sp_{min}$$

Ecuación 11

Donde:

- C_o = Coeficiente de ocupación máxima
- Sp_{min} = Superficie predial mínima [m²]

La superficie del primer piso será entonces, una cota inferior si se asumen los valores extremos de cada una de las variables.

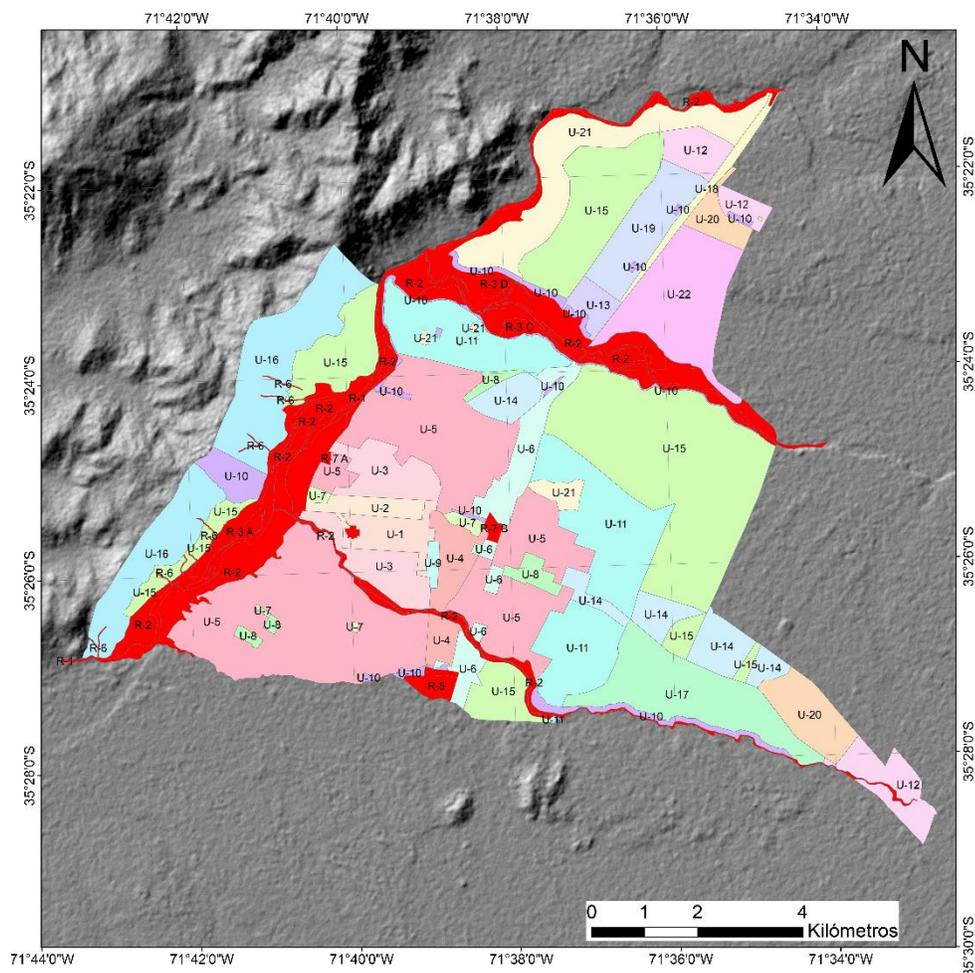


Figura 34: Plan regulador comunal de Talca. Las etiquetas corresponden a los nombres de las zonas urbanas. FUENTE: Municipalidad de Talca (2011).

3.4.1.1 Categorías urbanas

Se generó un mapa de categorías urbanas en base a imágenes satelitales y a las limitantes impuestas por el plan regulador en términos de superficies prediales (Figura 35) con la finalidad de asignar demandas unitarias a cada zona urbana. Las zonas resultantes son agregados de polígonos pertenecientes al PRC.

La sectorización espacial se detalla a continuación:

Zona A: Zona mixta con casas y principalmente edificios comerciales y edificios públicos. Además, hay colegios, el casino de Talca y la Plaza de Armas. Las casas son grandes, cercanas a los 100 m², y corresponden al casco antiguo de la ciudad. Corresponde a las zonas U1, U2 y U8 del plan regulador comunal de Talca.

Zona B: Zonas de esparcimiento, entre las que se incluyen centros deportivos, estadios y áreas verdes. Se incluyen, además, zonas exteriores de la ciudad con muy bajas densidades poblacionales. Son las zonas U7, U10, U15, U16, U17 y U20 del plan regulador comunal de Talca.

Zona C: Zona mixta principalmente residencial en la que se incluyen colegios y edificios pequeños. Incluye a los barrios “norte” y “sur”, pertenecientes al casco antiguo de la ciudad. Es la zona U3 del plan regulador comunal de Talca.

Zona C2: Zona casi únicamente residencial. Corresponden a casas amplias con situaciones socioeconómicas altas. Son las zonas U11, U12, U13, U14 y U18 del plan regulador comunal de Talca.

Zona D: Zona mixta principalmente residencial en la que se incluyen colegios y el Hospital de Talca. La mayoría de las viviendas corresponde a poblaciones y villas. Es donde se concentra la mayor cantidad de población de la ciudad. Incluye el sector de La Florida y Lircay. Son las zonas U4 y U5 del plan regulador comunal de Talca.

Zona I: Zona industrial. Corresponde a lugares con industrias donde no hay viviendas. Son las zonas U6 y U19 del plan regulador comunal de Talca.

Zona F: Terminal de ferrocarriles. No hay viviendas. Zona U9 del plan regulador comunal de Talca.

Zona R: Zona de restricción. Zonas donde está prohibido el destino vivienda por las razones especificadas anteriormente. Incluye a las zonas U21, U22 y a las zonas con código R, ya que en el decreto oficial del plan regulador se prohíbe expresamente el destino “vivienda”.

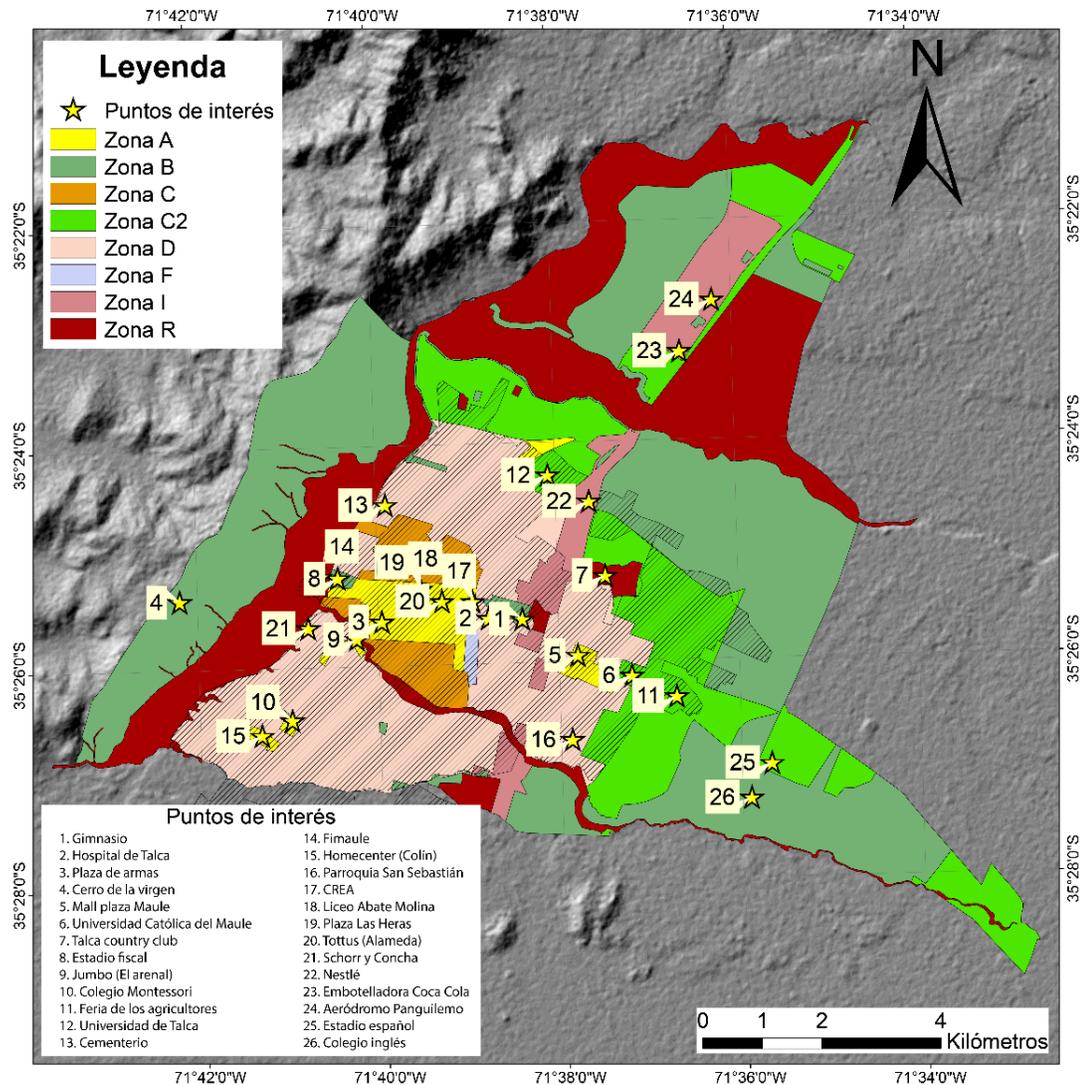


Figura 35: Sectorización de la ciudad según categorías urbanas a partir del plan regulador comunal de Talca. FUENTE: Elaboración propia.

En la Tabla 8 se detallan las principales características de cada zona. La agrupación se refiere al tipo de vivienda legalmente construable en cada sector del PRC. La simbología es la siguiente:

- C: Continua. Casas en fila con 2 muros aladaños (comunes).
- A: Aislada. Casas con todos sus muros independientes.
- P: Pareada. Casas con 1 muro aladaño (común).

Zona de limitante espacial	Código Zona PRC	Nombre zona PRC	Coef. de ocupación de suelo	Agrupamiento permitido			Superficie predial mínima [m2]	Área máxima primer piso [m2]
				C	A	P		
A	U-1	Centro comercial	0.9	C			400	360
	U-2	Centro institucional	0.8	C	A		400	320
	U-8	Equip. y densificación residencial	0.6	C	A	P	400	240
B	U-7	Equipamiento deportivo recreacional	0.4		A		2500	1000
	U-10	Equip. recreacional - área verde	0.15		A		2500	375
	U-15	Vivienda	0.6		A	P	300	180
	U-16	Vivienda poniente	0.3		A		2000	600
	U-17	Vivienda baja densidad - agroindustria	0.4		A		2000	800
	U-20	Servicios de transporte	0.3		A		2500	750
C	U-3	Densificación residencial	0.6	C	A	P	400	240
C2	U-11	Vivienda densidad media	0.6	C	A	P	200	120
	U-12	Villorrio residencial	0.5	C	A	P	250	125
	U-13	Villorrio mixto	0.5	C	A	P	250	125
	U-14	Equipamiento y vivienda	0.6	C	A	P	400	240
	U-18	Mixta con limitaciones	0.6		A		2000	1200
D	U-4	Mixta residencial	0.8	C	A	P	200	160
	U-5	Residencial densidad media	0.3	C	A	P	200	60
F	U-9	Nodo comercial - transporte	0.9	C			1000	900
I	U-6	Industria inofensiva	0.6	C	A	P	200	120
	U-19	Industria e infraestructura	0.5		A		2500	1250
R	U-21	Recreacional - deportiva	0.15		A		2500	375
	U-22	Agricultura y agroindustria	0.05		A		2500	125

Tabla 8: Resumen de la homologación del plan regulador con las zonas de limitantes espaciales. Se detallan las limitantes espaciales correspondientes a las superficies prediales mínimas y el área máxima del primer piso de cada vivienda según su ubicación en el PRC.

3.4.1.2 Demandas unitarias

En base a la sectorización de categorías urbanas se asignó, a cada zona, una tipología de vivienda según el tipo preponderante en cada polígono, a excepción de las zonas U21, U22, I, F y R, ya que en el PRC se prohíbe expresamente el destino “vivienda”. Estas tipologías fueron homologadas a partir de aquellas definidas en UNTEC (2014) y sus características geométricas se detallan en el Anexo 8.6⁹.

La demanda unitaria ha sido calculada por UNTEC (2014) usando la *suite* informática RetScreen, la cual utiliza el método de los grados día. El valor obtenido representa el máximo de la demanda durante el año, es decir, en el día más frío. Dicha temperatura alcanza los 2.6 [°C] en promedio durante un día. La temperatura de confort escogida por dicho estudio es de 19 [°C].

Para realizar la asignación de tipologías, se hizo un cruce de información correspondiente a 2 condiciones:

1. El área del primer piso de la casa debe ser menor al valor obtenido mediante el coeficiente de ocupación y la superficie predial mínima (Tabla 8).
2. El tipo de agrupamiento de la tipología debe estar permitido en la zona del plan regulador comunal.

En base a esto, se generó la Tabla 9, la cual resume la asignación realizada para cada zona espacial.

Categoría urbana	Tipología UNTEC (2014)	Agrup.	Área 1 ^{er} piso [m ²]	Área total [m ²]	Demanda máxima instantánea anual (pre 2000) [kW]	60% de demanda máxima instantánea [kW]	Porcentaje cubierto de viviendas
A	T4	C	26	52	4.2	2.52	2%
B	T1	A	57	57	12.7	7.62	19%
C	T6	P	49	85	8.7	5.22	14%
C2	T5	P	68	68	9.9	5.94	23%
D	T7	P	33	33	4.7	2.82	10%
F	-	-	-	-	-	-	69%
I	-	-	-	-	-	-	
R	-	-	-	-	-	-	

Tabla 9: Resumen de las tipologías asignadas a cada zona del plan regulador y sus demandas asociadas.

Las tipologías escogidas se rigen bajo la reglamentación térmica previa al año 2000 y alcanzan a cubrir un 69% del total de viviendas de Talca. Dicha normativa era muchísimo más flexible que la actual y comprende el 86% de las casas de la ciudad, lo que

⁹ Para mayor información acerca de parámetros térmicos específicos de cada tipología, consultar UNTEC (2014).

demuestra el bajo nivel de avance que existe en torno al tema del reacondicionamiento térmico y a la eficiencia energética ligada a esto. Este hecho es patente al observar la Tabla 10 y comparar cómo varían las demandas unitarias de cada tipología en función de la reglamentación térmica imperante.

Período	Demanda máxima por tipología [kW]				
	T1	T4	T5	T6	T7
Pre 2000	12.7	4.7	9.9	8.7	4.7
2000 - 2007	5.7 (- 55 %)	2.7 (- 42 %)	3.7 (- 62 %)	5.2 (- 40 %)	2.1 (- 55 %)
2007 - 2016	4.3 (- 66 %)	2.7 (- 42 %)	3.1 (- 68 %)	4.7 (- 45 %)	1.8 (- 61 %)
Post 2016	3 (- 76 %)	2.2 (- 53 %)	2.3 (- 76 %)	3.4 (- 60 %)	1.2 (- 74 %)

Tabla 10: Demandas térmicas de cada tipología escogida en función del período de reglamentación térmica. Entre paréntesis se detalla el ahorro con respecto a una demanda bajo la normativa previa al año 2000. Fuente: Elaboración propia con datos de UNTEC (2014).

3.4.2 Solución geotérmica de baja temperatura

A continuación, se exponen los resultados obtenidos para cada sistema de calefacción con bombas de calor geotérmicas.

3.4.2.1 Sistema vertical abierto

Para el cálculo de la profundidad mínima del pozo de extracción se deben considerar varios factores, los que se incorporan en la Ecuación 12 y se resumen en la Figura 36.

$$Profundidad\ a\ perforar_{(GWHE)} = NE + S_W + P_S + S_S \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

- NE = profundidad del nivel estático [m]
- S_W = Abatimiento [m]
- P_S = Profundidad de seguridad [m]
- S_S = Sello sanitario [m]

La profundidad de seguridad ha sido establecida en 3 metros; esta viene dada por las variaciones estacionales máximas observadas en Talca por la DGA durante la temporada seca (Figura 10). La profundidad asociada al sello sanitario es aquella considerada durante la construcción del pozo profundo, la cual fue determinada en base a la observación de expedientes de la DGA y fue establecida en 3 metros. El abatimiento, si bien depende del caudal extraído y principalmente de la conductividad hidráulica, se considerará como aquel máximo muestreado en las pruebas de bombeo, es decir, 33 metros (Tabla 11). Entonces, en total, se deben sumar cerca de 39 metros al nivel estático para obtener una profundidad mínima de operación del pozo de extracción y que

garantice que el pozo no se secará, por lo que se tiene una simplificación de la Ecuación 12 en la Ecuación 13:

$$\text{Profundidad a perforar} = NE + 39 \text{ [m]}$$

Ecuación 13

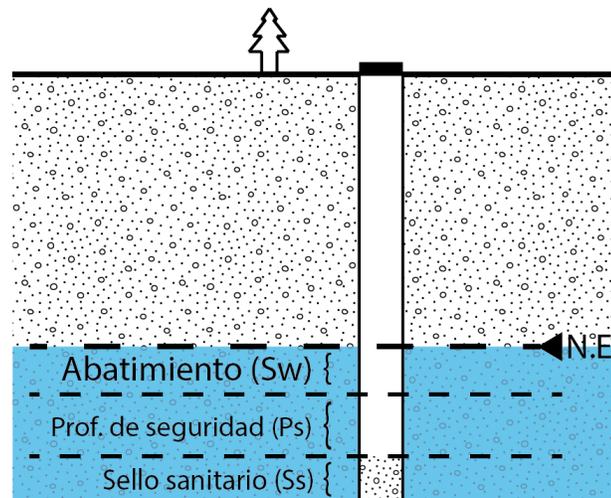


Figura 36: Diagrama de un pozo de extracción utilizado para sistemas GWHE y de las consideraciones a la hora de calcular la profundidad a perforar. FUENTE: Elaboración propia.

Tipología	Potencia [kW]	Caudal asociado [l/s] (Arola et al., 2014)	Máximo abatimiento [m]
A	2.52	0.12	33
B	7.62	0.36	33
C	5.22	0.25	33
C2	5.94	0.28	33
D	2.82	0.13	33

Tabla 11: Caudal asociado y abatimiento puntual de cada tipología espacial. FUENTE: Elaboración propia.

Dado que el efecto que produce el cambio en la demanda unitaria sobre la profundidad de perforación ya ha sido incorporado y considerado con creces con el abatimiento máximo, se calculará únicamente la profundidad de perforación para una única demanda. Esto se hará solamente con la finalidad de visualizar con mayor orden los resultados obtenidos.

Mediante cotizaciones con varias empresas del rubro en la ciudad de Talca, se obtuvo un valor de mercado del metro lineal de perforación (Assadrilling e Hidrotal). Este valor ronda los 130.000 [\$/m]. Este costo considera únicamente la perforación del pozo (10 [pulgadas]), su habilitación con tuberías de PVC ranurado y la construcción del sello sanitario. Si se opta por un encamisado de criba de acero, el costo del metro lineal asciende a 160.000 [\$/m] aproximadamente.

Para calcular los costos asociados únicamente a la perforación, se debe considerar un pozo de extracción y uno de reinyección. El segundo, no necesariamente debe llegar hasta el nivel estático, ya que la pluma de agua más fría reinyectada debiera difundir lentamente en los sedimentos de manera de no afectar la temperatura del agua que potencialmente está siendo extraída aguas abajo. Además, la tasa de infiltración en cada punto de reinyección dependerá de las características estratigráficas propias del pozo.

Se asumirá, con fines meramente ilustrativos que la infiltración es eficiente en todo punto. Se calculará, además, una profundidad del pozo de reinyección que llegue hasta el nivel estático. Esto se resume en la Ecuación 14.

$$\text{Costo de perforación (GWHE)} = C_m \cdot (2P_p - 39) \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

- C_m = Costo de perforación por metro lineal de sondaje [\$/m]
- P_p = Profundidad a perforar [m]

El resultado de la profundidad de perforación y su costo asociado se presenta en la Figura 37. Como se observa, es básicamente el mismo resultado que el de la Figura 15, pero con los 39 metros extra ya mencionados.

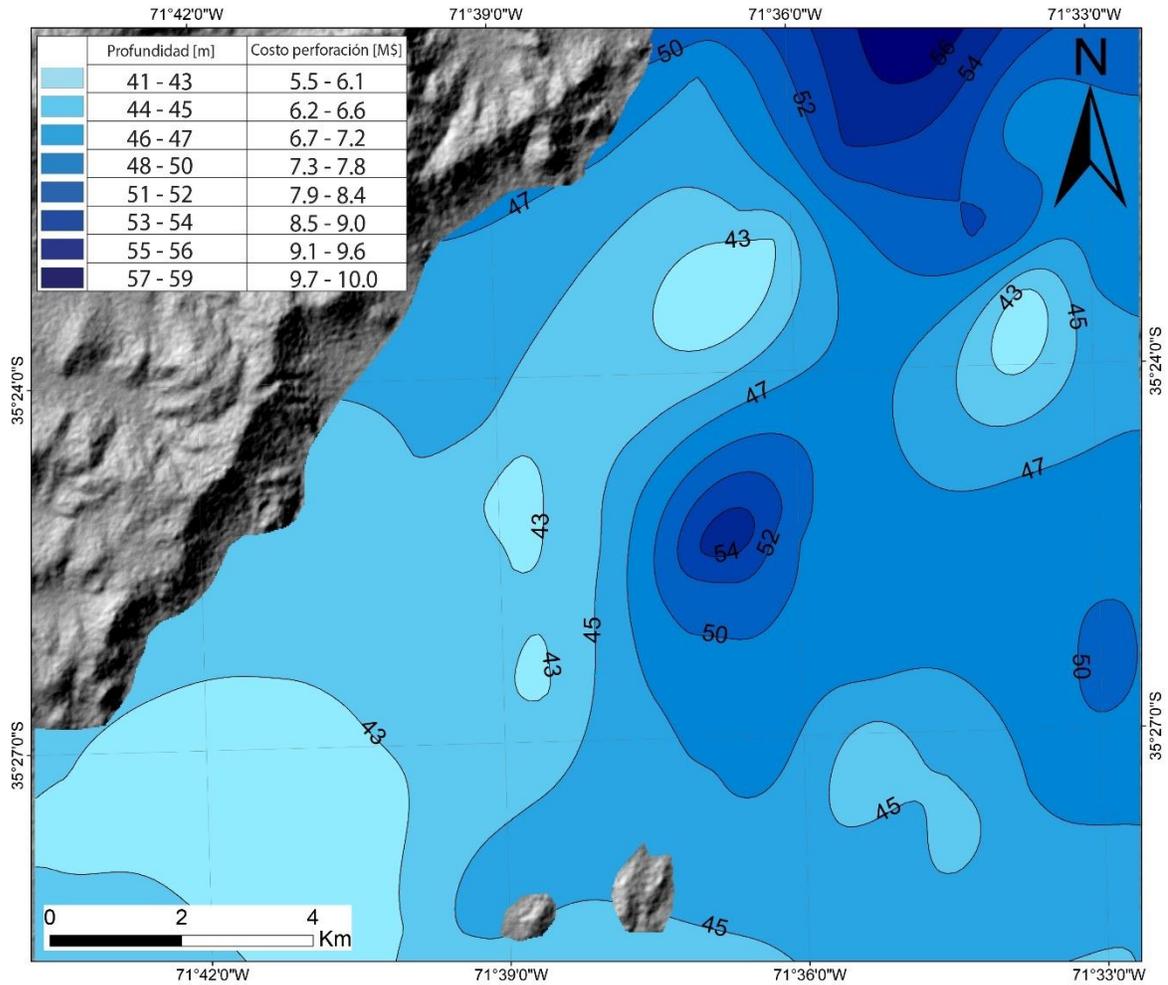


Figura 37: Profundidad a perforar para habilitar un sistema vertical abierto (GWHE) y el costo asociado a las perforaciones considerando un pozo de extracción y uno de reinyección en la ciudad de Talca. FUENTE: Elaboración propia.

3.4.2.2 Sistema vertical cerrado

Usando la información obtenida en la sección 3.3.4 se calculará la profundidad a perforar para satisfacer cierta demanda y su costo asociado en perforación. Esta profundidad se obtendrá a partir de la interpolación obtenida en la sección 3.3.4.2, la cual se encuentra representada en la Figura 33.

La profundidad a perforar será obtenida mediante la Ecuación 15 y se resume en la Figura 37.

$$Profundidad\ a\ perforar_{(BHE)} = \frac{P}{sHE_{prom}} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

- P = Demanda térmica a suplir [W]
- sHE_{prom} = sHE obtenido mediante *kriging* para Talca [W/m]

En este caso, no es necesaria la perforación de un pozo de reinyección, ya que no se extrae agua del acuífero. El cálculo del costo asociado a la perforación, entonces, se resume en la Ecuación 16, mientras que los resultados, en la Figura 38.

$$\text{Costo de perforación (BHE)} = C_m \cdot P_P$$

Ecuación 16

Donde:

- C_m = Costo de perforación por metro lineal de sondaje [\$/m]
- P_P = Profundidad a perforar [m]

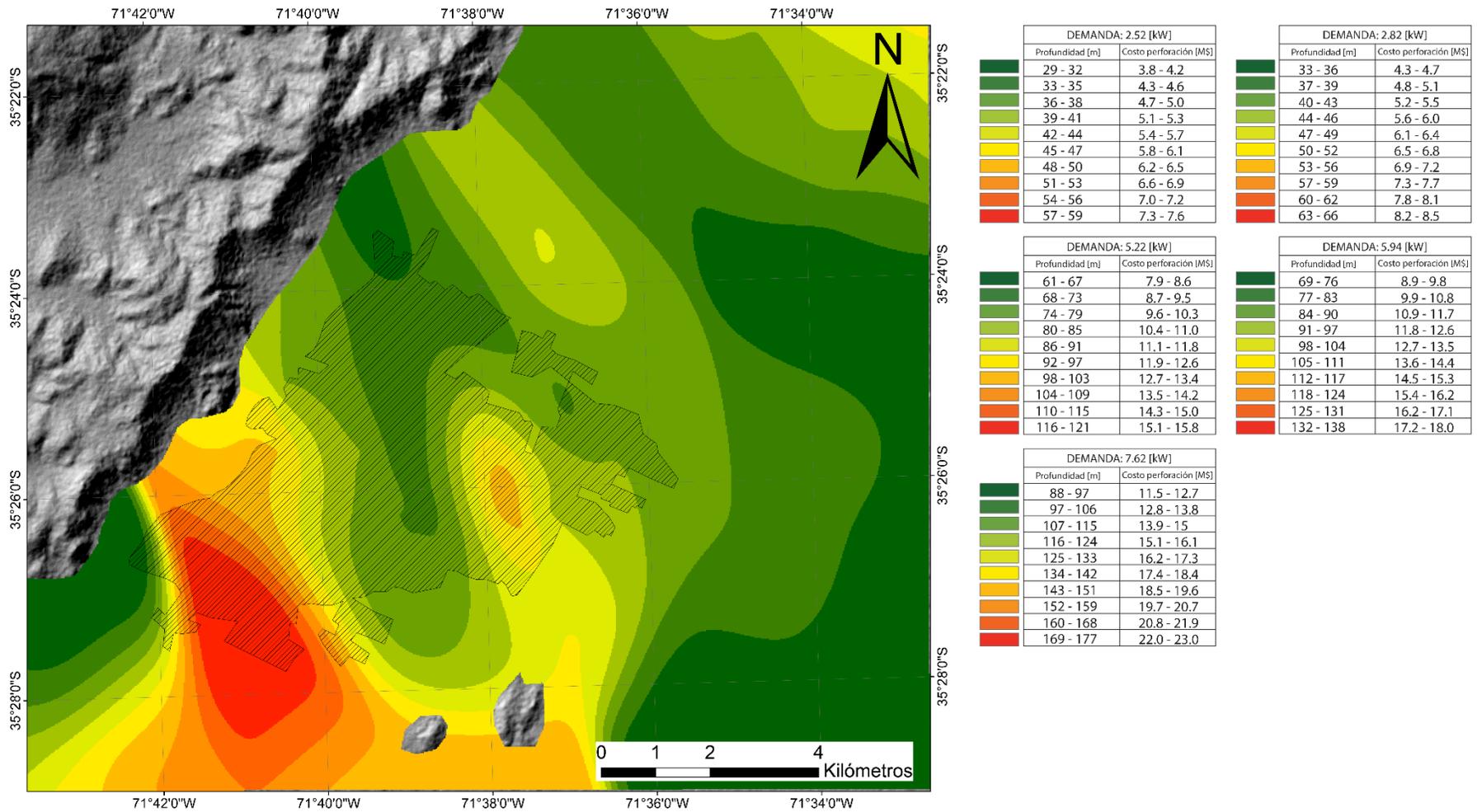


Figura 38: Resultados de la profundidad de perforación y sus costos asociados para diferentes demandas de calefacción en la ciudad de Talca usando un sistema vertical cerrado (BHE). FUENTE: Elaboración propia.

3.4.2.3 Sistema horizontal cerrado

Utilizando la Ecuación 7 y los resultados obtenidos en la sección 3.3.2 se puede estimar un área mínima de colección de calor para cierta demanda. En este caso, se utilizará el COP mínimo obtenido, para cubrir el peor escenario, el cual es igual a 3.5.

Usando datos de la norma alemana VDI 4640 (Tabla 12), se puede estimar el área de colectores horizontales necesaria para suplir cierta demanda. Al igual que para el cálculo del sHE_{prom} en el caso de los sistemas BHE, se utilizará un valor asumiendo que el sistema opera por 2400 horas al año en un suelo cohesivo húmedo, dado que se utilizará en invierno. El valor de energía específica máxima extraíble (sEE^{10}) a usar será de 20 $[W/m^2]$, ya que es la media de los valores expuestos por la norma. Se recomienda usar una separación entre los colectores de, al menos, 60 centímetros (ATECYR, 2012).

Suelo	Energía específica máxima extraíble (sEE)	
	1800 horas al año $[W/m^2]$	2400 horas al año $[W/m^2]$
Suelo seco	10	8
Suelo cohesivo, húmedo	20 - 30	16 - 24
Arenas/gravas saturadas	40	32

Tabla 12: Energía específica máxima extraíble por colectores horizontales según norma VDI 4640. FUENTE: Pipelife (2015).

Con estos parámetros, y utilizando la Ecuación 17, se obtiene el área necesaria de colectores horizontales para suplir las demandas expuestas. El resumen se encuentra en la Tabla 13.

$$\text{Área colector} = \frac{Q_{SUELO}}{sEE} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

- Q_{SUELO} = Calor a extraer desde el suelo. Corresponde a la demanda máxima total ponderada por el COP $[W]$
- sEE = Energía específica máxima extraíble desde el suelo por un colector horizontal cerrado $[W/m^2]$

¹⁰ sEE: *Specific energy extraction*, por sus siglas en inglés.

Categoría urbana	60% Demanda [kW]	Q _{SUELO} [kW]	Área de colectores [m ²]
A	2.52	1.8	90
B	7.62	5.4	272
C	5.22	3.7	186
C2	5.94	4.2	212
D	2.82	2.0	101

Tabla 13: Área necesaria de colectores horizontales para satisfacer cierta demanda térmica. FUENTE: Elaboración propia.

Conociendo el área de los colectores asociados a cierta demanda, se puede conocer qué polígonos del plan regulador cumplen con las demandas espaciales areales. El resumen se expone en la Tabla 14.

Categoría urbana	Zona urbana PRC	60% Demanda [kW]	Superficie predial mínima [m ²]	Área primer piso [m ²]	Área del colector [m ²]	¿Sistema cabe?
A	U-1	2.52	400	26	90	sí
	U-2	2.52	400	26	90	sí
	U-8	2.52	400	26	90	sí
B	U-7	7.62	2500	57	272	sí
	U-10	7.62	2500	57	272	sí
	U-15	7.62	300	57	272	no
	U-16	7.62	2000	57	272	sí
	U-17	7.62	2000	57	272	sí
	U-20	7.62	2500	57	272	sí
C	U-3	5.22	400	49	186	sí
C2	U-11	5.94	200	68	212	no
	U-12	5.94	250	68	212	no
	U-13	5.94	250	68	212	no
	U-14	5.94	400	68	212	sí
	U-18	5.94	2000	68	212	sí
D	U-4	2.82	200	33	101	sí
	U-5	2.82	200	33	101	sí

Tabla 14: Resumen de decisión para sistemas horizontales cerrados. En la última columna se encuentra el resultado para cada zona urbana según su demanda asignada. FUENTE: Elaboración propia.

De la Tabla 14 se desprende que en las únicas zonas donde la implementación de un sistema horizontal cerrado no sería posible por temas de espacio serían U-11, U-12, U-13 y U-15.

4. Discusión

La geología propuesta tanto por Hauser (1995) como por Morales (2014) difiere, en primer lugar, en la distribución espacial de los depósitos cineríticos asociados a volcanismo y, en segundo lugar, en la definición de las rocas que conforman la Cordillera de la Costa. El primer punto es el más importante, ya que permite tomar decisiones con respecto al tema de este estudio: los depósitos cineríticos tienen una conductividad hidráulica considerablemente menor a la de gravas y arenas, lo que conduce a una menor capacidad para extraer agua y una menor velocidad del flujo subterráneo en el acuífero. Se propone como trabajo futuro una mejor caracterización de la hidrogeología bajo la ciudad de Talca, a una menor escala, con el fin de poder constreñir la información y lograr una toma de decisiones más certera, dado que, al maximizarse el conocimiento, se reduce el riesgo asociado a una posible inversión.

Debe considerarse que, en el caso de decidirse por el método de los BHE, es necesario un estudio en detalle de la estratigrafía del pozo, ya que esto permitirá constreñir la estimación de potencia extraíble. El sHE puede ser medido con mayor precisión mediante *tests* de respuesta térmica efectuados in-situ. No se recomienda realizar una instalación usando los mapas realizados en este estudio, ya que estos fueron calculados a escala regional (1:30.000) con la información disponible y su finalidad es la de conocer el potencial mínimo que tiene el sistema. Si se desea realizar una implementación particular se recalca el hecho de que, para estimar con buena precisión la oferta térmica de un pozo, se debe conocer en detalle la estratigrafía del mismo. El potencial estimado para sistemas verticales cerrados depende directamente de la estratigrafía provista para la realización de este trabajo. Esta estratigrafía ha sido unificada bajo los criterios del autor citado, sin embargo, si se deseara incorporar más datos debiera hacerse bajo estos mismos criterios, ya que una no homogenización de los datos podría conducir a falsas estimaciones o a discrepancias. Lo mismo ocurre en zonas donde la densidad de puntos con estratigrafía conocida es baja, ya que puede haber ocurrencias locales de lentes arcillosos o cineríticos que harían disminuir cualquier estimación de potencial.

Es muy importante notar que el sHE promedio obtenido para cada pozo depende de la profundidad hasta la que ha sido registrada la estratigrafía, es decir, este promedio puede variar si se aumentan los metros de registro. Por ejemplo, si un pozo de 30 metros registra 10 metros de arcilla y 20 metros de grava con alto flujo subterráneo, su sHE promedio será de 72 [W/m], valor que se utiliza en este estudio como un parámetro intrínseco del pozo, independiente de la profundidad a perforar. Esta aproximación no es exacta, pero es el método propuesto por Gemelli et al. (2011) y dado que la profundidad a perforar tiende a ser mayor o igual a la del pozo muestreado, el sHE promedio calculado tiende a ser representativo o al menos a cubrir un caso conservador.

La variación de la temperatura de las aguas subterráneas sufre un cambio bajo la ciudad, el cual podría deberse al “efecto isla” (Zhu et al., 2010). Este aumento de la temperatura es favorable para sistemas verticales, ya que el potencial térmico aumenta. Además, la geoterma parece ser arrastrada hacia el NW por el Río Lircay, lo cual podría indicar un aporte desde el río hacia el acuífero.

Los COP obtenidos para los sistemas GWHE no consideran en el cálculo la potencia de bombeo requerida por una bomba sumergible ni por un eventual sistema de distribución en superficie (calefacción distrital), ya que se encuentra fuera de los alcances de este trabajo. Este cálculo, junto con el *pipíng*¹¹, debe ser considerado en cada evaluación particular si se opta por este sistema y debe ser realizado, de preferencia, por un ingeniero civil mecánico o profesional afín. De esta forma, podría aprovecharse de manera óptima el calor extraído, además de permitir diseños de distribución distrital que permitirían una inversión menor por usuario, ya que el costo de una perforación sería asumido por un mayor número de personas.

Con el fin de constreñir la estimación del potencial geotérmico en sistemas horizontales cerrados, es deseable tener registros de temperatura del subsuelo durante, al menos, la época en la que se vaya a implementar el sistema (invierno). Esto puede conseguirse con un termómetro *data logger* enterrado a la profundidad deseada durante la temporada. De todas maneras, como se explica en la sección 3.3.2, la variación de la temperatura en profundidad es mínima, por lo que los resultados obtenidos aquí son bastante confiables para la ciudad de Talca.

Se propone, para estudios posteriores, el estudio del carácter geoquímico del agua en términos de dureza, principalmente. Aguas de carácter incrustante harán que los intercambiadores dentro de la bomba pierdan eficiencia al disminuir paulatinamente la superficie de intercambio calórico, por lo que se sugiere un análisis de dureza para cada pozo que vaya a utilizar un sistema abierto (GWHE). En general, durante la construcción de un pozo y al realizarse las pruebas de bombeo correspondientes, se toman muestras de agua con las cuales este análisis puede realizarse de manera fácil. La mantención asociada a un posible carácter incrustante del agua debe considerarse, entonces, en los parámetros de inversión y costo a largo plazo del sistema. Otra alternativa es la instalación de sistemas ablandadores previos al de intercambio de calor.

Los abatimientos observados en la Figura 31 parecen estar controlados exclusivamente por la conductividad hidráulica de los sedimentos. Se observa que, hacia el este de la ciudad, donde se ubica morfológicamente el abanico aluvial del Río Maule, los descensos provocados por el bombeo son menores que dentro de la ciudad, donde, según Hauser (1995) se ubicarían depósitos cineríticos de edad pleistocena. Hacia el noreste de la ciudad, los abatimientos son intermedios. Esto podría estar controlado por una menor extensión de los depósitos piroclásticos ya mencionados y por una mayor preponderancia del abanico aluvial del Río Lircay.

La velocidad real del agua calculada a partir de la velocidad de Darcy, corresponde únicamente a aquellas capas de sedimentos compuestas de arenas y/o gravas. El parámetro que condiciona esto es la permeabilidad efectiva. Este parámetro debe usarse con cautela ya que no considera dentro de su estimación la compactación provocada por la columna sedimentaria, y, en consecuencia, la disminución de la permeabilidad efectiva a causa de esta compactación. Por otra parte, las capas sedimentarias compuestas de

¹¹ Cálculo y diseño de los sistemas de tuberías asociados a la distribución del calor.

limo, arcilla y cenizas se consideran impermeables en la práctica, por lo que no permitirían un alto flujo subterráneo.

Debe considerarse que las demandas térmicas asociadas a cada tipología propuesta por UNTEC (2014) han sido calculadas bajo el supuesto de un aislamiento térmico deficiente, con normativas previas al año 2000. Esto se debe a que al menos un 86% de los hogares presentes en Talca al año 2014 están contruidos bajo exigencias pre 2000, lo que sugiere que, si bien la demanda no ha sido sobredimensionada, podría reducirse considerablemente si se realizara un reacondicionamiento térmico a estos hogares. Esta reducción de demanda fluctúa entre un 53% y un 76% (ver Tabla 10) y podría marcar la diferencia desde el punto de vista de la inversión, ya que la muestra que cubre este estudio es aproximadamente un 69% de los hogares en la ciudad. Además, dado que el estudio realizado por UNTEC ha sido calculado bajo una temperatura de confort de 19°C, el valor se encuentra subestimado si trabajamos con una temperatura de confort de 20°C. Por otra parte, y dado que la ordenanza municipal que ratifica el plan regulador comunal vigente es del año 2011, existe una gran mayoría de los hogares que no se ciñen a estas normativas, lo que hace más difícil el catalogar y caracterizar la vivienda “tipo” de cada zona urbana definida en el mismo. Este hecho es una gran fuente de error en la estimación de las demandas, por lo que se sugiere, para un próximo estudio, una mejor categorización de las viviendas apuntando únicamente a la ciudad de Talca, donde aún existe un gran número de casas contruidas con material ligero, ampliaciones fuera de norma e incluso construcciones de adobe.

A partir de una demanda de 5.22 [kW] siempre será más conveniente la implementación de un sistema vertical abierto (GWHE) por sobre uno cerrado (BHE), lo cual se debe, principalmente, a lo somero de los niveles estáticos bajo Talca y a las buenas transmisividades de los sedimentos. Por otra parte, para las demandas más bajas (2.52 y 2.82 [kW]), existen sectores donde un sistema vertical cerrado todavía sería más conveniente que uno vertical abierto. Estos sectores se plasman en la Figura 39 y la Figura 40. Las zonas en que se propicia el uso de sistemas BHE son aquellas en que el flujo subterráneo es más rápido y además la estratigrafía es apta, es decir, predominan los niveles de gravas y/o gravas con arenas. El sector poniente de la ciudad (zonas urbanas U-10 y U16) se ve desfavorecido por la Cordillera de la costa, ya que no es plausible la instalación de sistemas verticales desde el Río Claro hacia el oeste. Si bien, el sector más próximo al curso de agua se trata de lecho de río, conforme se avanza hacia el oeste, el espesor sedimentario se hará cada vez más delgado, impidiendo la implementación de sistemas abiertos y/o haciendo mucho más caro el proceso al tratarse de perforación en roca. A pesar de esta imposibilidad, las zonas U-10 y U-16 sí son aptas para la instalación de colectores horizontales, ya que poseen espacio en sus predios.

Por último, debe considerarse que no se realizó una estimación de los costos de perforación de norias, sistema de captación de aguas subterránea que disminuiría considerablemente el costo de perforación y consecuente habilitación de un sistema GWHE.

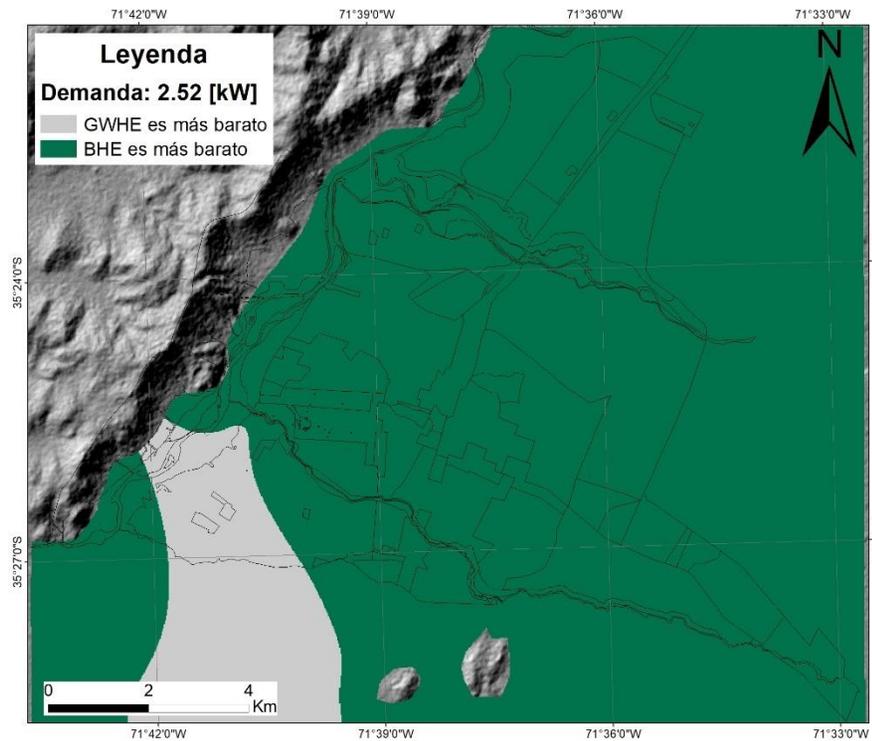


Figura 39: Mapa de decisión de costos para una demanda de 2.52 [kW], usando sistemas verticales y el PRC de Talca. FUENTE: Elaboración propia.

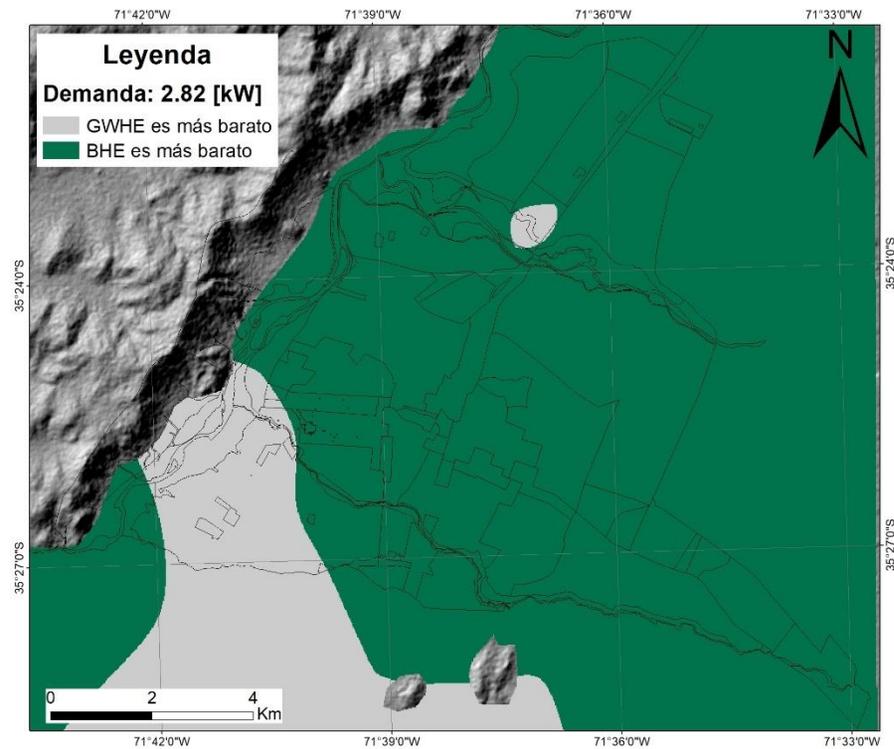


Figura 40: Mapa de decisión de costos para una demanda de 2.82 [kW], usando sistemas verticales y el PRC de Talca. FUENTE: Elaboración propia.

5. Recomendaciones

Se recomienda una mejor supervisión en Talca mediante al menos una estación de registro del nivel estático y temperatura en un lugar central de la ciudad y una caracterización adecuada del acuífero mediante sistemas geofísicos para su adecuada conservación y explotación. Esto, con la finalidad de tener una base actualizada para la comparación estacional.

La medición de los niveles estáticos iniciales de muchas de las pruebas de bombeo parece estar fuertemente influenciada por la actividad de pozos aledaños en operación. El nivel estático medido, entonces, corresponde a un nivel dinámico, lo que agrega incertidumbre y error a la interpolación. Se recomienda un mejor procedimiento de toma de datos a la hora de realizar una prueba de bombeo con el fin de medir el nivel estático local de manera no perturbada y con la mayor certeza posible.

Con el fin de promover la proliferación de estos sistemas de calefacción, sería recomendable una más amigable en torno a la geotermia de baja temperatura y que además englobe parte de las tareas realizadas por la DGA, introduciendo un nuevo tipo de aprovechamiento del recurso subterráneo y reduciendo el tiempo asociado a la petición de este recurso. Aumentar la difusión de proyectos exitosos también ayudaría a un mayor conocimiento colectivo y a considerar una opción que implique geotermia.

En comparación con países como Alemania o Dinamarca, se tiene una muy baja cantidad de información disponible, además de dispersa y poco consolidada. En este sentido, sería recomendable que, por ejemplo, existiese una homogenización de las columnas estratigráficas creadas por quienes perforan y habilitan un pozo, un monitoreo de los niveles estáticos constante y sus respectivas temperaturas, además de una plataforma dedicada a la integración de la información relacionada con el tema.

6. Conclusiones

La información previa existente en la zona de estudio, tanto la geología como la estratigrafía asociada a los depósitos sedimentarios, es deficiente. No existen consensos con respecto a las unidades que afloran ni se ha hecho una homologación formal de las mismas. Por otra parte, a pesar de que la caracterización hidrogeológica existente, obra de Hauser (1994) es bastante acuciosa, es aún de una escala muy extensa para los objetivos de este trabajo. El relleno sedimentario bajo la ciudad son principalmente gravas en matrices arenosas con ocasionales niveles cineríticos que pueden afectar en los flujos subterráneos de agua al ser menos permeables.

La calidad del acuífero bajo la ciudad de Talca es buena, tanto por el relleno sedimentario presente, por lo somero de sus niveles estáticos y por las altas transmisividades observadas en la mayor parte de los puntos. Dada la profundidad del basamento, es posible realizar perforaciones en relleno sedimentario hasta al menos los 500 metros en la zona más al sur de la ciudad. Además, las aguas subterráneas presentan temperaturas bastante altas y aptas para sistemas de captación geotérmica (15.8 – 19.2°C).

Se concluye que la zona norte de la ciudad es especialmente propicia para la implementación de sistemas BHE dado que la velocidad del flujo es alta. Esto se condiciona principalmente por el alto gradiente hidráulico existente. Además, se concluye que la conductividad hidráulica es el factor condicionante de primer orden para bajas velocidades de flujo.

El abatimiento provocado por el bombeo del agua en sistemas verticales abiertos, es un parámetro de primer orden en la determinación de la profundidad de perforación y, en consecuencia, del costo asociado al uso de este sistema. Para demandas mayores, debe calcularse el abatimiento puntual y en caso de la implementación de sistemas distritales, un cálculo del abatimiento provocado por un eventual conjunto de pozos de extracción.

En la ciudad de Talca, en particular, existe un gran potencial de mejoramiento de las características térmicas de las viviendas, ya que al año 2011 la gran mayoría (un 89%) todavía se rige por reglamentaciones térmicas previas al año 2000. Un reacondicionamiento térmico mínimo a estos hogares, permitiría una reducción considerable en las demandas asociadas a calefacción.

7. Bibliografía

- Alfaro, A. (2011). Peligro Sísmico en el Segmento norte de la Región del Maule, Chile. *Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología*. 141 pp.
- Andújar Márquez, J. M., Martínez Bohórquez, M. Á., & Gómez Melgar, S. (2016). Ground Thermal Diffusivity Calculation by Direct Soil Temperature Measurement. Application to very Low Enthalpy Geothermal Energy Systems. *Sensors*, 16(3), 306.
- Angelotti, A., Alberti, L., La Licata, I., & Antelmi, M. (2014). Energy performance and thermal impact of a Borehole Heat Exchanger in a sandy aquifer: Influence of the groundwater velocity. *Energy Conversion and Management*, 77, 700-708.
- Arola, T., Eskola, L., Hellen, J., & Korkka-Niemi, K. (2014). Mapping the low enthalpy geothermal potential of shallow Quaternary aquifers in Finland. *Geothermal Energy*, 2(1), 1.
- Asociación técnica española de climatización y refrigeración (ATECYR) (2012). Guía técnica: diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado. 52 pp.
- BB Solutions (2015). Proyecto geotérmico de calefacción en vivienda social. Comunicación personal.
- Bravo Espinosa, P. J. (2001). Geología del borde oriental de la Cordillera de la Costa entre los ríos Mataquito y Maule, VII Región. Geología del borde oriental de la Cordillera de la Costa entre los ríos Mataquito y Maule, VII Región. *Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología*. 113 pp.
- Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes, CEGA (2012). Inédito.
- Corporación de desarrollo tecnológico de la Cámara chilena de la construcción, CDT (2010). Estudio de usos finales y curva de la oferta de la conservación de la energía en el sector residencial. 443 pp.
- Cordis Europa (2016). Periodic Reporting for period 1 - TEES (A high-efficiency energy storage system that captures energy generated from renewable sources, waste energy from industry, and solar radiation, in a compressed fluid and heat pump hybrid system.) 2 pp.
- Comisión Nacional de energía (2009). Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social. *Ministerio de Energía*. 203 pp.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). Hidrología subterránea. Ediciones Omega. 1194 pp.
- De Swardt, C. A., & Meyer, J. P. (2001). A performance comparison between an air-source and a ground-source reversible heat pump. *International Journal of Energy Research*, 25(10), 899-910.

- Dirección General de Aguas, DGA (2015). Guía para la presentación de solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas. Consulta a página web realizada el 18 de enero de 2017. *Ministerio de Obras Públicas*. 2pp. <http://www.dga.cl/orientacionalpublico/guias/Guias%20para%20presentacion%20de%20solicitudes/subteraneo.pdf>
- Dirección General de Aguas, DGA (2017). Consulta a página web realizada el 18 de enero de 2017. Centro de Recursos hídricos (DGA). *Ministerio de Obras Públicas*. <http://www.arcgis.com/apps/OnePane/basicviewer/index.html?appid=1f120f5a187149e0a0a30c4ab144ddae>
- Explorador CR2 (2016). Consulta a página web realizada el 25 de noviembre de 2016. *Departamento de Geofísica, Universidad de Chile*. <http://explorador.cr2.cl/>
- Florides, G., & Kalogirou, S. (2007). Ground heat exchangers—A review of systems, models and applications. *Renewable energy*, 32(15), 2461-2478.
- Gaínza, V. (2014). Estimación del potencial geotérmico de baja temperatura, mediante el uso de bombas de calor geotérmicas, en la cuenca del Maule, entre los 35, 2° y 35, 6° S. *Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología*. 127 pp.
- GCF Ingenieros Ltda. (2010). Levantamiento de información hidrogeológica para modelación cuenca Río Maule. *Ministerio de Obras Públicas; Dirección general de aguas*. 193 pp.
- Gemelli, A., Mancini, A., & Longhi, S. (2011). GIS-based energy-economic model of low temperature geothermal resources: A case study in the Italian Marche region. *Renewable energy*, 36(9), 2474-2483.
- González-Mendizabal, D. (2000). Guía de Intercambiadores de Calor: Tipos Generales y Aplicaciones. *Universidad Simón Bolívar, Caracas*. 67 pp.
- Hauser, A. (1994). Hoja Talca. Mapa 1: Talca (1 de 2) Carta Hidrogeológica de Chile No. 2. *Servicio Nacional de Geología y Minería*.
- Instituto Nacional de Estadísticas, INE (2002). Censo Nacional 2002.
- Kusuda, T., & Achenbach, P. R. (1965). Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States (No. NBS-8972). *National Bureau of Standards Gaithersburg MD*.
- Leyton, F., Ruiz, S., & Sepúlveda, S. A. (2010). Reevaluación del peligro sísmico probabilístico en Chile central. *Andean geology*, 37(2), 455-472.
- Maripanguí, R., Muñoz, M., Aravena, D., García, K., Daniele, L., Morata, D. (2016). Assessment of geothermal heat pump systems in Coyhaique city, Chilean Patagonia. 38th New Zealand Geothermal Workshop.
- Marsily, G. D. (1986). Quantitative hydrogeology: groundwater hydrology for engineers (No. 551.49 M3). 440 pp.

- Ministerio de Energía (2016). Quién es quién, en sistemas geotérmicos con bombas de calor. Documento elaborado en el marco del proyecto “Estado de desarrollo de proyectos de bombas de calor geotérmicas instalados en Chile” desarrollado por AIGUASOL para CIFES. 60 pp.
- Ministerio del Medio Ambiente (2013). Diagnóstico de la calidad del aire y medidas de descontaminación en Talca y Maule. 52 pp.
- Ministerio del Medio Ambiente (2016). Plan de descontaminación atmosférica: estrategia para Talca y Maule 2014 - 2018.
- Molina, C, & Veas, L. (2012). Evaluación del confort térmico en recintos de 10 edificios públicos de Chile en invierno. *Revista de la construcción*, 11(2), 27-38. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2012000200004>
- Morales Molina, C. A. (2014). Producción de calor radiogénico y flujo de calor en las rocas del basamento de la cuenca de Talca. *Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología*. 88 p.
- Municipalidad de Talca (2011). Ordenanza municipal del Plan regulador comunal. Consulta realizada el 13 de octubre de 2016. Documento disponible en la web: http://www.observatoriourbano.cl/lpt/cehu_resultado_decreto.asp?r=7&c=130&i=25
- Muñoz, M., Garat, P., Flores-Aqueveque, V., Vargas, G., Rebolledo, S., Sepúlveda, S., Morata, D. & Parada, M. Á. (2015). Estimating low-enthalpy geothermal energy potential for district heating in Santiago basin—Chile (33.5° S). *Renewable Energy*, 76, 186-195.
- Pipelife (2015). Geothermal piping system. Geothermal energy sustainable into the future. *Pipelife International GmbH*. 32 pp.
- Quaschnig, V. (2016). Understanding renewable energy systems. Routledge. 289 pp.
- Quiroz Valencia, F. F. (2014). Modelación gravimétrica, para evaluar el potencial geotermal de baja entalpía, de la cuenca de la Provincia de Talca, VII Región del Maule, Chile. *Tesis para optar al grado de magíster en ciencias mención geofísica, FCFM Universidad de Chile*. 132 pp.
- Rosén, B., Gabrielsson, A., Fallsvik, J., Hellström, G., & Nilsson, G. (2001). System för värme och kyla ur mark-En nulägesbeskrivning. Linköping: Statens Geotekniska Institut, (511).
- Schiel, K., Baume, O., Caruso, G., & Leopold, U. (2016). GIS-based modelling of shallow geothermal energy potential for CO₂ emission mitigation in urban areas. *Renewable Energy*, 86, 1023-1036.
- Seisdedos Saez, M. A. (2012). Climatización de edificios por medio del intercambio de calor con el subsuelo y agua subterránea, aspectos a considerar en el contexto local. *Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento de Geología*. 131 pp.

- Todoran, T. P., & Balan, M. C. (2016). Long term behavior of a geothermal heat pump with oversized horizontal collector. *Energy and Buildings*, 133, 799-809.
- UNTEC (2014). Alternativas tecnológicas para calefacción residencial con energías renovables no convencionales aplicables a la realidad chilena. *Programa de gestión y economía ambiental*. 210 pp.
- Varela, J., & Moreno, H. (1982). Los depósitos de relleno de la Depresión Central de Chile entre los Ríos Lontué y Bío-Bío. Actas III Congreso Geológico de Chile (pp. F280-F306, volumen 3).
- Vielma Sossa, M. S. (2013). Diseño e integración de energía geotérmica de baja entalpía aplicada a proyectos de construcción residencial. *Memoria de Título, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile*. 128 pp.
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) 4640, (2001). "Thermal use of the underground – VDI 4640 part 2 - Ground source heat pump systems". Beuth Verlag, Berlin. Germany.
- Waterloo Hydrogeologic (2016). AquiferTest 2016.1 user's manual. An easy-to-use pumping test and slug test data analysis package. 438 pp.
- Yao, L., Huo, Z., Feng, S., Mao, X., Kang, S., Chen, J., ... & Steenhuis, T. S. (2014). Evaluation of spatial interpolation methods for groundwater level in an arid inland oasis, northwest China. *Environmental earth sciences*, 71(4), 1911-1924.
- Zhu, K., Blum, P., Ferguson, G., Balke, K. D., & Bayer, P. (2010). The geothermal potential of urban heat islands. *Environmental Research Letters*, 5(4), 044002.

8. Anexos

8.1 Zonas urbanas definidas por el plan regulador (PRC) de Talca

Código Zona	Nombre zona	Coefficiente de ocupación de suelo	Agrupamiento
U-1	Centro comercial	0.9	Continuo
U-2	Centro institucional	0.8	Continuo, aislado
U-3	Densificación residencial	0.6 0.4 (edificios)	Aislado, pareado, continuo
U-4	Mixta residencial	0.8	Aislado, pareado, continuo
U-5	Residencial densidad media	0.3	Aislado, pareado, continuo
U-6	Industria inofensiva	0.6	Aislado, pareado, continuo
U-7	Equipamiento deportivo recreacional	0.4	Aislado
U-8	Equipamiento y densificación residencial	0.6	Aislado, pareado, continuo
U-9	Nodo comercial - transporte	0.9	Continuo
U-10	Equipamiento recreacional - área verde	0.15	Aislado
U-11	Vivienda densidad media	0.6	Aislado, pareado, continuo
U-12	Villorrio residencial	0.5	Aislado, pareado, continuo
U-13	Villorrio mixto	0.5	Aislado, pareado, continuo
U-14	Equipamiento y vivienda	0.6	Aislado, pareado, continuo
U-15	Vivienda	0.6	Aislado, pareado
U-16	Vivienda poniente	0.3	Aislado
U-17	Vivienda baja densidad - agroindustria	0.4	Aislado
U-18	Mixta con limitaciones	0.6	Aislado
U-19	Industria e infraestructura	0.5	Aislado
U-20	Servicios de transporte	0.3	Aislado
U-21	Recreacional - deportiva	0.15	Aislado
U-22	Agricultura y agroindustria	0.05	Aislado

Tabla 15: Áreas urbanas definidas en el plano regulador de Talca. FUENTE: Artículo 20, Municipalidad de Talca (2011).

8.2 Información de pozos

8.2.1 Niveles estáticos

Código pozo / Expediente DGA	UTM Norte [m]	UTM Este [m]	Nivel estático [m]	Altura DEM [m]	Cota hidráulica [m]
APR Pangué Arriba	6086841	278573	18	170	152
APR San Diego - La Granja	6060916	276552	35	233	198
APR Santa Corina	6080461	262598	0.5	84	84
Aguas Nuevo sur_Pelarco	6081333	278689	10	159	149
Aguas Nuevo Sur_Pulluquen	6056727	255773	10	106	96
Aguas Nuevo Sur_San Jeronimo	6057522	253499	14	90	76
Aguas Nuevosur_San Rafael	6089847	270901	22	140	118
APR Alto Pangué	6085128	265932	22	121	99
APR Bobadilla	6060185	256364	6	102	96
APR Bobadilla Bajo	6059558	254652	3	92	89
APR El Manzano - El Suspiro	6076942	281483	30	188	158
APR Escorpion Ltda - Aurora	6069359	270402	8	153	145
APR Huilquilemu	6072261	266365	1	121	120
APR La Batalla	6079682	277355	19	160	141
APR Lomas de las Tortillas	6054300	251494	4	86	82
APR Pangué Abajo	6084795	275126	10	143	133
APR Panguilemo-Pozo antiguo	6082830	264560	17.2	118	101
APR Ramadilla de Lircay	6076933	267256	12	127	115
APR Ramquimili - Purisima	6076268	271330	6	136	130
APR Villa Illinois	6081658	267200	18	127	109
Hermanos Espinoza	6057664	265241	8	154	146
Hospital de Talca Pozo 10	6076517	259647	3	92	89
Hospital de Talca Pozo 11	6076459	259625	3	97	94
Hospital de Talca Pozo 9	6076538	259696	3	91	88
Karl Schulze	6077707	257765	9	74	65
ND-0702-1172	6075951	263201	14.09	123	109
ND-0702-1177	6075235	265150	11.66	128	116
ND-0702-1189	6081826	263073	8.22	104	96
ND-0702-1214	6073350	272250	14.03	153	139
ND-0702-1255	6066037	262956	2.92	134	131
ND-0702-1282	6075990	259275	7.46	88	81
ND-0702-1283	6071502	265353	10.94	122	111
ND-0702-1320	6059736	271150	3.06	195	192
ND-0702-1325	6065486	269759	5.08	163	158
ND-0702-1335	6065507	267242	3.18	159	156
ND-0702-1349	6064057	275156	17.77	197	179
ND-0702-1377	6082216	265015	11.8	105	93
ND-0702-1380	6069390	254172	7.05	92	85
ND-0702-1389	6091887	278512	15.24	176	161
ND-0702-1391	6060277	271373	4.03	189	185
ND-0702-1402	6084002	265951	18	111	93
ND-0702-1416	6063664	255857	1.87	105	103

ND-0702-1419	6077061	275463	1.08	133	132
ND-0702-1424	6081423	263567	0	97	97
ND-0702-1443	6076607	269378	10.9	130	119
ND-0702-1456	6090362	274148	2.47	141	139
ND-0702-1460	6076100	276775	19.75	162	142
ND-0702-1461	6068394	273399	11.7	169	157
ND-0702-1462	6060335	279900	39.9	259	219
ND-0702-1468	6077190	261219	7.28	104	97
ND-0702-1475	6077711	268724	17.48	105	88
ND-0702-1476	6070656	276794	21.83	184	162
ND-0702-1480	6064565	262579	2.3	125	123
ND-0702-1498	6062719	282061	49	269	220
ND-0702-1520	6080770	262796	0	88	88
ND-0702-1521	6073312	259840	6	101	95
ND-0702-1526	6080650	267370	0	108	108
ND-0702-1528	6080433	267390	0	107	107
ND-0702-1530	6074621	268605	12.32	134	122
ND-0702-1552	6083068	264364	13.2	109	96
ND-0702-1575	6063567	263707	2.93	140	137
ND-0702-1576	6064636	262342	2.87	128	125
ND-0702-1586	6070514	268925	5.1	144	139
ND-0702-1593	6064786	256368	5.3	108	103
ND-0702-1608	6077366	263745	14.15	116	102
ND-0702-1643	6077362	281678	27.1	189	162
ND-0702-1672	6078931	259087	8.8	82	73
ND-0702-1745	6080559	274297	13	143	130
ND-0702-1763	6064540	252470	7.08	88	81
ND-0702-1846	6066562	269546	4.5	162	158
ND-0702-1898	6072546	255869	1	84	83
ND-0702-1899	6072761	253052	2.8	63	60
ND-0702-1904	6074657	258059	5.5	85	80
ND-0702-1915	6077692	259597	2.5	96	94
ND-0702-1916	6077445	259193	2.8	87	84
ND-0702-1920	6080846	262694	2.2	83	81
ND-0702-1934	6077575	264144	10.3	118	108
ND-0702-1935	6077643	263989	10.5	114	104
ND-0702-1946	6074523	262061	8.5	119	111
ND-0702-1996	6073418	262171	8.4	111	103
ND-0702-2004	6075400	262065	10	111	101
ND-0702-2013	6065521	257081	4	110	106
ND-0702-2014	6062993	255424	2	105	103
ND-0702-2024	6078394	261528	6	106	100
ND-0702-2071	6084251	262449	3.5	85	82
ND-0702-2081	6075260	262167	11	109	98
ND-0702-2126	6070211	249829	1.7	75	73
ND-0702-2128	6082225	277437	0	140	140
ND-0702-2131	6067846	260437	1.5	118	117
ND-0702-2133	6063278	260255	3.8	121	117
ND-0702-2137	6071676	266697	8.5	135	127

ND-0702-2142	6075790	264642	8.8	127	118
ND-0702-2171	6074133	262586	9	122	113
ND-0702-2190	6075271	259988	2.9	97	94
ND-0702-2210	6077031	263269	16	113	97
ND-0702-2216	6072528	265652	7.5	119	112
ND-0702-2226	6077050	258678	5.4	87	82
ND-0702-2252	6071740	269047	7	138	131
ND-0702-2263	6076916	263849	9	123	114
ND-0702-2272	6076589	263855	10.5	121	111
ND-0702-2309	6072424	267712	8	136	128
ND-0702-2362	6076170	265135	10.5	123	113
ND-0702-2383	6074636	260089	1.8	91	89
ND-0702-2397	6071010	258088	3	99	96
ND-0702-2438	6077183	263387	15	120	105
ND-0702-2485	6070817	259023	5	111	106
ND-0702-2512	6082827	260948	9	87	78
ND-0702-2527	6071176	265515	5.5	126	121
ND-0702-2534	6065602	259948	1.5	121	120
ND-0702-2546	6082361	276001	0.5	149	149
ND-0702-2592	6078479	259666	3	89	86
ND-0702-2595	6073214	266178	5.4	130	125
ND-0702-2604	6069013	258000	3.5	109	106
ND-0702-2612	6071516	250648	3.5	48	45
ND-0702-2613	6071591	266191	7.3	136	129
ND-0702-2621	6081514	266583	15.5	125	110
ND-0702-2641	6073455	263394	10	124	114
ND-0702-2680	6073650	264974	0.7	128	127
ND-0702-2697	6073688	263342	11.2	124	113
ND-0702-2724	6075981	263492	11	124	113
ND-0702-2736	6074960	262669	8.2	118	110
ND-0702-2742	6076304	262578	11.5	115	104
ND-0702-2755	6073185	267505	9	139	130
ND-0702-2761	6076114	263151	11	117	106
ND-0702-2775	6073640	262950	7.4	125	118
ND-0702-2782	6072160	252637	3.9	61	57
ND-0702-2833	6075808	265118	10	131	121
ND-0702-2835	6075850	265002	10.2	131	121
ND-0702-2857	6076181	262324	11	114	103
ND-0702-2866	6075878	259004	5	90	85
ND-0702-2876	6083241	267377	3.9	106	102
ND-0702-2877	6075447	264360	8.3	126	118
ND-0702-2898	6076830	263706	10.5	120	110
ND-0702-2923	6074827	260301	7	113	106
ND-0702-2927	6076185	262817	11	117	106
ND-0702-2958	6088377	269159	17.13	133	116
ND-0702-3014	6077078	262842	14.5	117	103
ND-0702-3117	6064460	262578	1.91	131	129
ND-0702-3118	6071291	259047	10.46	111	101
ND-0702-3119	6070496	260769	5	111	106

ND-0702-3135	6077470	257910	5.96	84	78
ND-0702-3194	6063689	263774	3.39	140	137
ND-0702-3196	6063780	263841	3.35	140	137
ND-0702-3200	6064273	262708	1.88	131	129
ND-0702-3212	6076786	260711	3.78	96	92
ND-0702-3221	6073331	252827	4.15	57	53
ND-0702-3308	6091678	280520	7.97	173	165
ND-0702-3316	6065337	256988	2.79	103	100
ND-0702-3433	6084937	262384	18.8	100	81
ND-0702-3452	6077583	261266	8	99	91
ND-0702-3462	6064353	262543	5.12	127	122
ND-0702-3463	6064494	262380	6.1	131	125
ND-0702-3483	6075881	277090	25.16	166	141
ND-0702-3496	6070825	250370	2.97	47	44
ND-0702-3510	6072676	257501	2.43	87	85
ND-0702-3536	6076719	262377	17.22	109	92
ND-0702-3537	6077137	263059	33	115	82
ND-0702-3554	6083969	263218	10.11	99	89
ND-0702-3557	6083119	264782	17.2	111	94
ND-0702-3650	6077591	257549	0	74	74
ND-0702-3660	6066546	271304	5.03	164	159
ND-0702-3665	6066388	271991	7.43	176	169
ND-0702-3694	6079022	272462	0.63	119	118
ND-0702-3701	6073685	255799	4.15	77	73
ND-0702-3711	6067754	276283	13.4	188	175
ND-0702-3722	6076478	263672	12.1	119	107
ND-0702-3723	6080006	267314	0	100	100
ND-0702-3724	6070788	280173	41.25	209	168
ND-0702-3791	6090666	271117	4.79	136	131
ND-0702-3799	6080106	267255	0	104	104
ND-0702-3805	6080990	268618	12.1	122	110
ND-0702-3832	6078701	261646	5.7	100	94
ND-0702-462	6080923	262977	0	97	97
Universidad de Talca	6078815	260921	6	99	93
VPC-0702-1	6076821	262640	18.99	112	93
VPC-0702-2	6077102	262133	14.94	136	121
VPC-0702-3	6090158	271103	21.85	144	122
VPC-0702-4	6076974	263036	20	112	92

Tabla 16: Niveles estáticos y cotas hidráulicas de los pozos utilizados para la creación de la Figura 15 y Figura 16. Los expedientes DGA corresponden a aquellos comenzados con ND y VPC. FUENTE: Derechos de aprovechamiento de aguas registrados en DGA, DGA.

8.2.2 Variaciones estacionales

Se utilizó información de niveles estáticos del observatorio de la DGA la cual está resumida en la Tabla 17.

. La ubicación de las estaciones es la siguiente (UTM):

- AP San Clemente: (274493, 6064593)
- AP Talca: (262664, 6077239)

AP SAN CLEMENTE			AP TALCA			
	1986	1987		1986	1987	1988
ENE	14.30	13.80	ENE	17.10	17.10	16.70
FEB	14.30	13.00	FEB	17.10	17.00	16.60
MAR	13.15	12.50	MAR	16.10	16.50	16.90
ABR	13.69	13.34	ABR	15.20	16.30	16.70
MAY	14.64	15.07	MAY	15.20	15.96	16.00
JUN	13.75	15.00	JUN	15.80	16.20	16.70
JUL	12.70	14.11	JUL	16.50	16.40	16.70
AGO	13.97	14.62	AGO	16.50	16.50	16.70
SEP	13.80	14.00	SEP	16.50	16.55	16.80
OCT	13.50	13.98	OCT	16.60	16.60	16.70
NOV	13.50	13.92	NOV	16.60	16.90	16.30
DIC	13.80	13.92	DIC	17.10	16.40	17.24

Tabla 17: Niveles estáticos [m] pertenecientes a estaciones de observación de la DGA. FUENTE: Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea, DGA.

8.2.3 Abatimiento

Expediente	UTM Norte	UTM Este	Caudal [l/s]	N.E. [m]	N.D. (24 horas) [m]	Abatimiento (24 horas) [m]
ND-0702-1172	6075951	263201	75	14.25	33.36	19.11
ND-0702-1177	6075235	265150	90	11.62	35.29	23.67
ND-0702-1189	6081826	263073	89	8.22	22.89	14.67
ND-0702-1214	6073350	272250	45	14.03	33.64	19.61
ND-0702-1255	6066037	262956	75	3.83	14.46	10.63
ND-0702-1282	6075990	259275	29.7	7.46	15.51	8.05
ND-0702-1283	6071502	265353	51	11.16	17.77	6.61
ND-0702-1320	6059736	271150	17	3.06	3.35	0.29
ND-0702-1325	6065486	269759	57	5.08	7.92	2.84
ND-0702-1335	6065507	267242	95	3.18	8.95	5.77
ND-0702-1349	6064057	275156	68	17.77	20.88	3.11
ND-0702-1377	6082216	265015	35	11.8	24.45	12.65
ND-0702-1380	6069390	254172	4	7.05	38.25	31.2
ND-0702-1389	6091887	278512	8.1	15.24	30.05	14.81
ND-0702-1402	6084002	265951	40.5	18.05	46	27.95
ND-0702-1416	6063664	255857	20	1.87	4.6	2.73
ND-0702-1419	6077061	275463	12	1.08	3.45	2.37
ND-0702-1424	6081423	263567	90	0	4.48	4.48
ND-0702-1443	6076607	269378	9	11.3	12.41	1.11

ND-0702-1456	6090362	274148	65	3.62	15.96	12.34
ND-0702-1460	6076100	276775	13	19.75	23.31	3.56
ND-0702-1461	6068394	273399	12	11.7	13.66	1.96
ND-0702-1462	6060335	279900	10	39.9	42.62	2.72
ND-0702-1468	6077190	261219	4.6	7.74	21.52	13.78
ND-0702-1475	6077711	268724	64	17.48	37.1	19.62
ND-0702-1476	6070656	276794	34	21.88	24.02	2.14
ND-0702-1480	6064565	262579	100	2.3	13.35	11.05
ND-0702-1498	6062719	282061	2.5	53.7	62.25	8.55
ND-0702-1520	6080770	262796	16.2	0	0.17	0.17
ND-0702-1521	6073312	259840	72	6	28	22
ND-0702-1526	6080650	267370	220	0	13.59	13.59
ND-0702-1528	6080433	267390	70	0	10.43	10.43
ND-0702-1530	6074621	268605	41.5	12.32	14.4	2.08
ND-0702-1552	6083068	264364	13.77	13.2	23.88	10.68
ND-0702-1575	6063567	263707	100	2.93	15.22	12.29
ND-0702-1576	6064636	262342	60	2.87	17.63	14.76
ND-0702-1586	6070514	268925	5	5.1	6.13	1.03
ND-0702-1593	6064786	256368	8	5.3	14.5	9.2
ND-0702-1608	6077366	263745	13.5	14.15	22.9	8.75
ND-0702-1643	6077362	281678	10	27.1	37.2	10.1
ND-0702-1745	6080559	274297	4.2	13	32	19
ND-0702-1763	6064540	252470	30	7.1	39.3	32.2
ND-0702-2958	6088377	269159	7	17.13	28.43	11.3
ND-0702-3117	6064460	262578	190	10.1	14.12	4.02
ND-0702-3118	6071291	259047	5.3	10.46	37.14	26.68
ND-0702-3119	6070496	260769	5	13.12	30.3	17.18
ND-0702-3135	6077470	257910	5	9.68	10.4	0.72
ND-0702-3194	6063689	263774	190	3.4	22.2	18.8
ND-0702-3196	6063780	263841	100	3.4	23.5	20.1
ND-0702-3200	6064273	262708	185	1.88	17.7	15.82
ND-0702-3212	6076786	260711	15	3.78	17.7	13.92
ND-0702-3221	6073331	252827	16	3.3	17.3	14
ND-0702-3308	6091678	280520	54	8	29.9	21.9
ND-0702-3316	6065337	256988	40	2.8	19.4	16.6
ND-0702-3433	6084937	262384	80	18.8	48.8	30
ND-0702-3452	6077583	261266	28	8	41.3	33.3
ND-0702-3462	6064353	262543	180	5.1	25.7	20.6
ND-0702-3463	6064494	262380	80	6.1	23.5	17.4
ND-0702-3483	6075881	277090	10.5	25.18	25.2	0.02
ND-0702-3510	6072676	257501	17.5	2.4	34.8	32.4
ND-0702-3536	6076719	262377	50	17.2	40.3	23.1
ND-0702-3554	6083969	263218	15	10.2	22.8	12.6

ND-0702-3557	6083119	264782	16.5	17.2	30.1	12.9
ND-0702-3650	6077591	257549	8.4	0	1.2	1.2
ND-0702-3660	6066546	271304	108	5	8.6	3.6
ND-0702-3665	6066388	271991	10.8	9.3	11.6	2.3
ND-0702-3711	6067754	276283	8.5	15.4	18.2	2.8
ND-0702-3722	6076478	263672	5.3	12.1	17.1	5
ND-0702-3723	6080006	267314	150	0	22.7	22.7
ND-0702-3724	6070788	280173	11	41.3	42.3	1
ND-0702-3791	6090666	271117	16	4.8	25.6	20.8
ND-0702-3799	6080106	267255	220	0	21.4	21.4
VPC-0702-1	6076821	262640	60	19	21.5	2.5
VPC-0702-2	6077102	262133	50	15	21.7	6.7
VPC-0702-3	6090158	271103	16	21.8	26	4.2

Tabla 18: Abatimientos provocados por la extracción de cierto caudal constante en pruebas de bombeo de largo aliento (24 horas). FUENTE: Elaboración propia, con datos del Centro de Recursos hídricos, DGA.

8.2.4 Estratigrafía

Los pozos utilizados para los perfiles estratigráficos son los siguientes:

8.2.4.1 Perfil E – W

Código	UTM Norte	UTM Este	Desde [m]	Hasta [m]	Litología
AA41	6077559	256780	0	1	Arena
			1	9	Grava en matriz de arena
			9	14	Arena con fragmentos de grava
			14	20	Grava en matriz de arena
			20	35	Arena con fragmentos de grava
AA89	6076361	258627	0	10	Depósitos cineríticos
			10	17	Grava
			17	37	Limo con fragmentos de arena
			37	45	Grava en matriz de arena
			45	50	Limo con fragmentos de grava
AA62	6076251	259391	0	9	Arena en matriz de limo y/o arcilla
			9	50	Arena con fragmentos de grava
AA90	6076052	262473	0	1	Vegetal

			1	17	Arena en matriz de limo y/o arcilla
			17	20	Grava en matriz de limo y/o arcilla
			20	32	Grava en matriz de arena
			32	40	Grava
			40	50	Limo con fragmentos de grava
			50	60	Grava en matriz de limo y/o arcilla
AA10	6071622	265502	0	4	Limo
			4	20	Grava en matriz de limo
			20	30	Grava en matriz de arena
			30	36	Grava
			36	40	Grava en matriz de arena
			40	44	Grava
			44	46	Arcilla
			46	48	Arcilla con fragmentos de grava
			48	50	Grava en matriz de arcilla
			50	52	Grava en matriz de arena
			52	56	Grava
			56	68	Grava en matriz de arena
			68	70	Arcilla con fragmentos de grava
AA63	6069635	270445	0	4	Limo y/o arcilla
			4	18	Limo con fragmentos de grava
			18	35	Grava en matriz de arena
AA66	6064317	274540	0	3	Limo y/o arcilla
			3	16	Grava
			16	49	Grava en matriz de arena
			49	50	Grava en matriz de limo y/o arcilla

Tabla 19: Pozos utilizados en creación de perfil E - W. FUENTE: Alfaro (2011).

8.2.4.2 Perfil N – S

Código	UTM Norte	UTM Este	Desde [m]	Hasta [m]	Litología
AA09	6081826	263073	0	4	Arcilla
			4	8	Arena
			8	36.5	Arena
AA06	6080982	263042	0	2	Grava
			2	6	Arcilla
			6	48	Grava en matriz de arena
			48	50	Arcilla
AA36	6079952	262032	0	18	Grava en matriz de arena
			18	24	Arena
			24	38	Arcilla
			38	42	Grava en matriz de arena
AA60	6077033	263022	0	1	Vegetal
			1	20	Depósitos cineríticos
			20	32	Grava en matriz de arena
			32	35	Grava
AA90	6076052	262473	0	1.5	Vegetal
			1.5	17	Arena
			17	20	Grava
			20	32	Grava en matriz de arena
			32	40	Grava
			40	60	Grava
AA27	6075234	262085	0	15	Arena en matriz de limo y/o arcilla
			15	50	Grava en matriz de arena
AA35	6074690	261575	0	1	Arcilla

			1	12	Arena
			12	47	Grava en matriz de arena
			47	60	Arena en matriz de limo y/o arcilla
AA77	6069848	259044	0	5	Arcilla
			5	27	Depósitos cineríticos
			27	40	Grava en matriz de arena
AA80	6066302	256652	0	13	Arena en matriz de limo y/o arcilla
			13	16	Arcilla
			16	24	Grava en matriz de arena
			24	28	Arena
			28	35	Arena en matriz de limo y/o arcilla
AA67	6060088	255090	0	17	Grava
			17	32	Arcilla
			32	35	Arena

Tabla 20: Pozos utilizados en creación de perfil N - W. FUENTE: Alfaro (2011).

8.3 Temperaturas medias mensuales en Talca

8.3.1 Estación "Talca U.C."

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1983	21.65	20.51	17.62	14.21	9.42	6.77	7.82	9.87	10.77	15.31	18.41	20.94
1984	20.96	19.49	18.21	13.9	9.59	7.27	8.57	9.14	12.29	13.63	15.81	19.04
1985	20.5	19.33	17.42	12.75	10.81	10.75	8.95	8.94	12.01	13.84	17.16	19.43
1986	20.26	19.85	16.94	13.17	11.93	9.29	8.6	10.34	11.43	16.05	15.88	19.79
1987	21.31	21.42	18.95	13.8	9.86	9.41	9.31	9.94	11.93	15.05	17.93	19.49
1988	20.3	21.36	18.15	13.97	9.38	9.04	7.49	8.9	10.92	14.13	18.12	19.73
1989	21.5	21.43	17.61	14.06	10.22	9.09	8.1	8.8	11.07	14.2	18.23	19.36
1990	21	19.73	17.31	14.26	10.39	7.96	8.24	10.41	12.01	13.56	16.58	19.46
1991	20.36	20.58	17.6	15.22	11.73	9.37	8.49	9.27	12.02	13.96	16.83	17.96
1992	21.74	19.88	19.04	13.21	10.64	7.94	6.71	9.51	12.17	13.85	17.46	19.41
1993	21.85	21.84	19.96	14.35	10.22	9.63	7.15	9.94	11.12	14.37	16.64	19.73
1994	21.68	20.32	18.84	14.56	11	10.9	8.21	8.69	12.76	15.01	17.54	19.86
1995	21.16	20.13	18.27	15.21	11.36	10.24	6.87	8.99	12	14.27	17.39	21.74

1996	20.42	20.32	18.55	13.31	10.78	7.15	8.49	10.65	11.86	14.51	18.16	20.12
1997	21.09	19.78	19.31	16.29	12.01	9.13	8.84	10.21	12.03	14.23	17.44	19.87
1998	21.05	20.34	18.59	14.64	12.73	9.15	8.57	8.67	12	16.15	17.78	20.66
1999	22.2	22.14	18.31	13.63	10.92	9.17	7.25	10.57	12.28	14.45	17.32	19.51
2000	20.31	19.51	16.77	13.54	10.13	9.59	6.42	9.01	11.03	14.44	16.94	20.18
2001	20.52	21.08	18.26	13.74	10.7	7.96	9.58	10.14	11	14.95	16.71	21.24
2002	21.04	20.09	17.05	13.34	9.72	6.16	6.77	10.74	12.06	14.42	16.41	19.63
2003	21.64	19.89	18.82	14.02	9.9	10.4	8.24	10.09	12.52	15.61	17.52	18.28
2004	21.46	20.72	18.94	14.66	9.92	7.38	7.61	9.71	12.35	14.2	17.14	21.04
2005	20.96	21.28	17.17	14.49	10.02	9.44	8.11	9.77	11.15	13.89	17.11	19.04
2006	21.38	21.44	17.88	14.95	10.71	10.93	9.25	9.96	10.95	13.26	17.68	19.65
2007	21.76	19.83	16.97	11.02	6.18	3.54	7.57	7.37	11.52	15.46	18.64	19.57
2008	22.44	22.14	18.9	14.23	10.13	7.88	9.19	9.13	12.65	14.91	18.22	19.9
2009	21.9	20.73	19.81	15.5	10.5	6.8	7.37	10.26	10.72	14.26	14.84	19.01
2010	20.67	18.39	17.99	12.75	9.04	8.09	5.83	9.58	11.85	14.24	17.4	18.12
2011	21.36	20.48	18.19	13.38	10.04	7.97	7.97	9.46	12.25	15.7	18.47	21.74
2012	21.86	21.49	20.41	14.69	12.58	10.51	8.02	10.16	13.82	14.65	18.36	18.5
2013	22.1	21.67	18.59	15.24	11.45	9.54	8.8	9.38	12.33	15.79	18.8	22.29

Tabla 21: Temperaturas medias mensuales de los últimos 30 años en la ciudad de Talca. FUENTE: DGA, estación "Talca, U.C."

8.3.2 Estación "Río Claro en Rauquén"

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1985	21.35	20.30	17.68	12.66	10.98	10.85	9.05	9.25	12.36	14.51	17.81	20.69
1986	21.61	20.89	17.49	13.53	12.34	9.41	8.72	10.48	11.90	16.70	16.80	20.77
1987	22.65	22.23	19.01	13.59	9.92	9.09	9.13	10.06	11.87	15.65	18.95	21.04
1988	21.56	22.47	18.25	14.20	9.63	8.84	7.48	9.07	11.42	14.78	18.77	20.89
1989	22.76	22.24	18.09	14.36	10.32	9.05	8.03	9.09	11.59	15.08	19.33	20.86
1990	22.25	20.66	17.83	13.97	10.33	7.99	8.04	10.36	12.22	14.15	17.68	20.61
1991	21.43	21.17	18.12	15.30	11.67	9.28	8.45	9.35	12.37	14.47	17.73	18.65
1992	22.72	20.64	19.34	13.32	11.00	7.86	6.79	9.51	12.42	14.45	18.30	20.44
1993	22.80	22.49	20.46	14.44	10.16	9.14	7.13	10.00	11.42	14.97	17.55	20.59

Tabla 22: Temperaturas medias mensuales entre los años 1985 y 1993 en la ciudad de Talca. FUENTE: DGA, estación "Río Claro en Rauquén".

8.4 Temperatura estabilizada del agua subterránea.

Se presentan datos medidos por CEGA (2012) en la ciudad de Talca. Estos datos corresponden a las temperaturas del agua en profundidad una vez que el perfil de variación se ha hecho constante. La medición fue hecha con un termómetro *datalogger* Antares 1854, el cual tiene una precisión de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$.

Pozo	UTM Norte	UTM Este	Cota [m.s.n.m.]	Temperatura [°C]
Aguas Nuevo sur: Estación Villa Alegre – S. José	6046592	257844	133	16.2
Aguas Nuevo sur: Pulluquén	6056727	255773	119	15.5

Aguas Nuevo sur: San Jerónimo	6057522	253499	107	16.5
Aguas Nuevo sur: Villa Alegre	6045277	253484	107	17.1
Aguas Nuevo sur: Pelarco	6081333	278689	168	17.9
Aguas Nuevo sur: San Rafael	6089847	270901	157	17.9
APR Alto Pangué	6085128	265932	120	19.8
APR Bajo Lircay - Punta Diamante	6069546	289465	288	16.7
APR Bobadilla Bajo	6059558	254652	105	16.1
APR Bobadilla	6060185	256364	117	17.3
APR Colbún RAU Ltda	6048603	282509	273	15.4
APR El álamo	6060022	279840	259	16.2
APR El Manzano - El Suspiro	6076942	281483	161	16.8
APR Escorpión Ltda - Aurora	6069359	270402	170	15.6
APR Huilquilemu	6072261	266365	133	16.3
APR La Batalla	6079682	277355	161	17.0
APR Lancha de Queri	6053577	282407	288	15.7
APR Las Lomas - San Clemente	6070189	299730	314	16.3
APR Lomas de las Tortillas	6054300	251494	105	16.9
APR Pangué Abajo	6084795	275126	155	17.5
APR Pangué Arriba	6086841	278573	172	17.1
APR Panguilemo-Pozo antiguo	6082830	264560	130	18.3
APR Ramadilla de Lircay	6076933	267256	135	16.3
APR Ramquimili - Purísima	6076268	271330	154	16.8
APR San Diego - La Granja	6060916	276552	245	16.2
APR Santa Corina	6080461	262598	89	16.7
APR Santa Rita	6080001	270952	138	17.1
APR Villa Illinois	6081658	267200	136	16.9
Hermanos Espinoza	6057664	265241	172	16.9
Hospital de Talca Pozo 9	6076538	259696	0	18.9
Hospital de Talca Pozo 10	6076517	259647	0	18.8
Hospital de Talca Pozo 11	6076459	259625	0	18.5
Karl Schulze	6077707	257765	83	18.4
Universidad de Talca	6078815	260921	101	17.6

Tabla 23: Temperaturas estabilizadas en profundidad medidas por Investigador CEGA (2012) en la ciudad de Talca y utilizadas en este estudio. FUENTE: CEGA (2016).

8.5 Gradientes hidráulicos

En la Figura 41 se presenta un mapa correspondiente a los gradientes hidráulicos obtenidos a partir de las cotas hidráulicas en la zona de estudio.

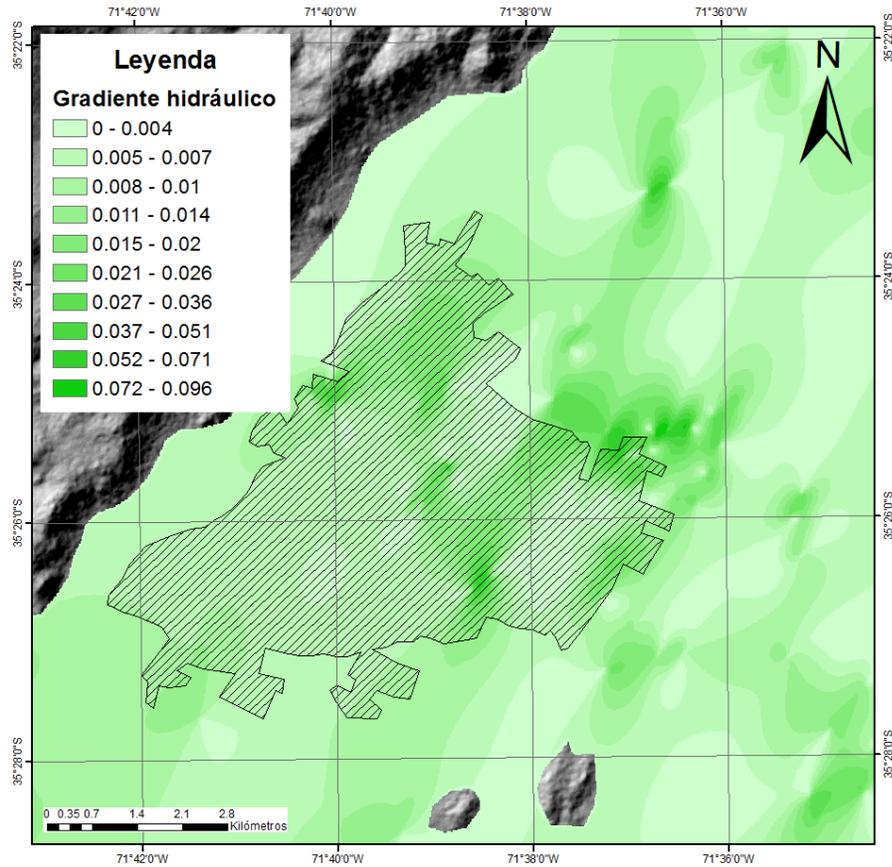


Figura 41: Gradientes hidráulicos obtenidos a partir de las cotas hidráulicas. FUENTE: Elaboración propia.

8.6 Tipologías de vivienda propuestas por UNTEC (2014).

8.6.1 Dimensionamiento

Tipología 1	
Superficie útil [m ²]	56.5
Área Ventanas Nor-Oeste [m ²]	5.4
Área Ventanas Nor-Este [m ²]	7.8
Área Ventanas Sur- Oeste [m ²]	0.5
Área Ventanas Sur- Este [m ²]	3.8
Área Muros Envolverte [m ²]	83.8
Altura Cielo [m]	2.4
Área Tejado [m ²]	60.2
Perímetro [m]	7.5
Relación ventanas/envolverte	21%
Volumen [m ³]	135.6

Tipología 2	
Superficie Util (piso 1) [m ²]	114.7
Superficie Útil (piso 2) [m ²]	106.5
Área Ventanas Norte [m ²]	28.7
Área Ventanas Sur [m ²]	16.4
Área Ventanas Este [m ²]	7.3
Área Ventanas Oeste [m ²]	0
Área Muros Envolverte [m ²]	199.8
Altura Cielo (piso 1) [m]	2.85
Altura Cielo (piso 2) [m]	2.88
Área Tejado [m ²]	121.6
Perímetro [m]	10.7
Relación ventanas/envolverte	26%
Volumen [m ³]	657

Tipología 3	
Superficie Útil (piso 1) [m ²]	63
Superficie Útil (piso 2) [m ²]	40
Área Ventanas Norte [m ²]	10.1
Área Ventanas Sur [m ²]	5.9
Área Ventanas Este/Oeste [m ²]	7.7
Área Muros Envolverte [m ²]	120.7
Área Techo [m ²]	63
Perímetro [m]	7.9
Relación ventanas/envolverte	20%
Volumen [m ³]	361

Tipología 4	
Superficie Util (piso 1) [m ²]	25.99
Superficie Útil (piso 2) [m ²]	25.99
Área Ventanas Norte [m ²]	3.32
Área Ventanas Sur [m ²]	2.93
Área Muros Envolverte [m ²]	82.89
Altura Cielo (piso 1) [m]	2.44
Altura Cielo (piso 2) [m]	2.355
Área Tejado [m ²]	26.48
Perímetro [m]	5.1
Relación ventanas/envolverte	8%
Volumen [m ³]	125

Tipología 5	
Superficie Útil [m ²]	67.7
Área Ventanas Norte [m ²]	3.95
Área Ventanas Sur [m ²]	1.44
Área Muros Envolverte [m ²]	51
Altura Cielo [m]	2.4
Área Tejado [m ²]	81.7
Perímetro [m]	8.2
Relación ventanas/envolverte	11%
Volumen [m ³]	162

Tabla 24: Dimensionamiento de las viviendas propuestas por UNTEC (2014) y utilizadas en este estudio. FUENTE: UNTEC (2014).

8.6.2 Materialidad

Tipología 1		
Elemento	Materialidad	Espesor [mm]
Muros Exteriores	Revestimiento estuco ext.	20
	Ladrillo Fiscal	150
	Revestimiento estuco int.	20
Cielo	Placa de Madera	8
Ventanas	Vidrio Simple	
Pisos	Hormigón 250 kg cem/m ³	34.9

Tipología 2		
Elemento	Materialidad	Espesor [mm]
Muros Exteriores 1 piso	Revestimiento estuco ext.	20
	Ladrillo fiscal	150
	Revestimiento estuco int.	20
Muros Exteriores 2 piso	Madera de pino tratada	12.5
	Tabique de madera 2"x3"	75
	Plancha Masissa	10
Cielo	Placa de madera	8
	Aislán	30
Ventanas	Vidrio Simple	
Pisos	Hormigón 250 kg cem/m ³	26.8

Tipología 3		
Elemento	Materialidad	Espesor [mm]
Muros Exteriores 1 piso	Revestimiento estuco ext.	20
	Ladrillo fiscal	150
	Revestimiento estuco int.	20
Muros Exteriores 2 piso	Madera de pino tratada	12.5
	Tabique madera 2"x3"	75
	Plancha masissa	10
Cielo	Placa de madera	8
	Aislán	30
Ventanas	Vidrio Simple	
Pisos	Hormigón 250 kg cem/m ³	26.8

Tipología 4		
Elemento	Materialidad	Espesor [mm]
Muros Exteriores	Acero Galvanizado ext	1
	Tabique madera 2" x 3"	75
	Revestimiento yeso cartón	8
Cielo	Entablado de madera	12.25
Ventanas	Vidrio Simple	
Pisos	Hormigón 250 kg cem/m ³	12.9

Tipología 5		
Elemento	Materialidad	Espesor [mm]
Muros Exteriores	Ladrillo fiscal	150
Cielo	Placa de madera	11
Ventanas	Vidrio simple	
Pisos	Hormigón H15	16.8

Tabla 25: Materialidad de las tipologías propuestas por UNTEC (2014) y utilizadas en este estudio. FUENTE: UNTEC (2014).