



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

ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE
BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS EN SECTORES RESIDENCIALES DE
OSORNO.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

VÍCTOR ALFONSO DÍAZ HERNÁNDEZ

PROFESOR GUÍA:
DIEGO MORATA CÉSPEDES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
DIEGO ARAVENA NOEMÍ
DOLORINDA DANIELE

Este trabajo ha sido financiado por el Centro de Excelencia en Geotermia de Los
Andes, CEGA. Proyecto FONDAP 15090013.

SANTIAGO DE CHILE

2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE: Geólogo
POR: Víctor Díaz Hernández
FECHA: 12 de septiembre del 2018
PROFESOR GUÍA: Diego Morata

ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS EN SECTORES RESIDENCIALES DE OSORNO.

Osorno se ubica en la Región de Los Lagos, entre los 40°21'S y 40°46'S. Actualmente, es una de las ciudades chilenas con mayor índice de contaminación atmosférica de material particulado (MP2,5 y MP10) y otros agentes, como consecuencia del abuso de leña en el sector residencial. Se proponen sistemas de bombas de calor geotermales acopladas a intercambiadores de calor como alternativa para satisfacer la demanda térmica, reduciendo la emisión de contaminantes atmosféricos.

Se estudian los parámetros hidrogeológicos y termales de aguas subterráneas y del suelo para determinar el potencial de extracción de calor que poseen. Se recopila información de expedientes de pozos profundos publicados por la Dirección General de Aguas y se reconocen potenciales acuíferos para la extracción de calor. La unidad principal presenta niveles estáticos entre 5,5 [m] y 44,6 [m] de profundidad y una dirección del flujo de agua hacia el oeste y el norte. Además, posee valores de transmisividad en el rango de 10 a 10^5 [m^2/d], alojándose en los sedimentos más gruesos de una compleja configuración estratigráfica que presenta unidades con características de acuitardo o acuícludo. En general, la temperatura del acuífero oscila entre los 13,3 y 14 [°C].

La demanda térmica se ha definido mediante una correlación entre tipologías de viviendas definidas para estándares chilenos y tipologías de viviendas de Osorno. Tomando el Plan Regulador Comunal, se establecen 6 zonas de interés relacionadas a las tipologías de viviendas que más se aproximan al uso residencial de suelo permitido.

A partir de la temperatura ambiental, se estima la temperatura anual del suelo a 1,5 [m] de profundidad, obteniendo un COP cercano a 3,8 y se calcula la superficie necesaria para satisfacer la demanda térmica en cada zona de interés mediante colectores horizontales cerrados (GCHP horizontal). Por otra parte, el 90% de la población posee un caudal de al menos 2 [L/s], generando un COP de 5,9 y una energía de 30,1 [kW], lo que satisface al menos 4 veces la demanda en sistemas verticales abiertos (GWHP). Finalmente, a partir de la estratigrafía de pozos, se obtiene el sHE promedio que permite estimar la profundidad de perforación necesaria, para extraer la energía que sustente la demanda térmica por medio de sistemas verticales cerrados (GCHP vertical).

Estos tres sistemas presentan ciertos alcances. En primer lugar, se opta por el sistema más económico (GCHP horizontal), pero su aplicación sólo es factible en la zona de interés E. Luego, si se dispone del recurso hídrico y, además, la profundidad de perforación de pozos en sistemas GWHP es menor que la profundidad de perforación en sistemas GCHP verticales, entonces se opta por sistemas GWHP. El alcance legal se limita a la petición de derechos no consuntivos de aguas.

Según los resultados obtenidos, la solución más eficiente es generar agrupaciones distritales de viviendas para sistemas GWHP, ya que tienen la capacidad de generar la

suficiente energía para satisfacer la demanda térmica de un agrupamiento, reduciendo los costos de perforación. Entonces, los GWHP pueden satisfacer la totalidad de la demanda térmica de Osorno.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer al Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes por entregarme la oportunidad de realizar este trabajo. A mis profesores Diego Morata y Linda Daniele por apoyarme en su desarrollo, entregando los aportes pertinentes para transformarme en un mejor profesional. A mi co-guía, Diego Aravena, por haber estado tan involucrado y disponible, por saber sacar una mejor versión de mí mismo ayudándome a confiar en mi trabajo, por entregarme diferentes puntos de vistas. Tampoco puedo dejar de agradecer la espera que ha significado la culminación de este trabajo y por haber respetado mi tiempo y salud.

Al Departamento de Geología, por haberme formado como profesional y entregarme las herramientas necesarias para desarrollarme como tal. A la Blanca por estar tan atenta y preocupada en mi salud y de que esta memoria haya llegado a término, muchas veces me buscaste cuando era mi deber ser el responsable. Gracias por entender y apoyar. Gracias al Centro de Alumnos de Geología por haber apoyado mi recuperación, ni siquiera nos conocíamos y estuvieron más pendientes que algunas personas.

A Watt's S.A., Feria de Osorno S.A., Prolesur S.A., Inmobiliaria Kaufmann, ESSAL S.A., MADEXPO LTDA., Frohlich y CIA LTDA., Agrosuper comercializadora de alimentos LTDA. y Club de Campo Osorno; por permitirme realizar mediciones en sus estancias.

A mi familia, padres y hermanos, gracias por darme todos los medios para poder sacar este proyecto adelante. Los amo y les dedico esto por haber sido mi pilar. Gracias por aguantar la montaña rusa de emociones que ha significado mi paso por la Universidad, por saber dar un consejo, por darme las fuerzas, por creer en mí y por saber guardar silencio y dejarme ser.

A mis compañeros, Los Gabros, que fueron parte importante de este proceso porque formaron parte del día a día, pues vivimos demasiados momentos juntos. Lo pasamos muy bien y muy mal, pero los recuerdo a cada uno con mucho afecto y espero que el cariño trascienda el paso por Geología. A mis amigos y compañeros que he creado en el camino universitario y que han sido parte importante del proceso.

Una mención especial a la Chili y a la Coni, porque estoy infinitamente agradecido de la vida por haberlas puesto en mi camino en momentos muy difíciles.

A mis amigos de la vida, Los Gorditos de Siempre, que sin duda han estado presentes en todo esto y en la vida. Gracias por impulsarme a terminar esto, por creer en mí, por apoyarme, quererme tal como soy. Han sido una perfecta válvula para escapar, evadir, volver a las raíces. A los Pototos, que se han transformado en otro nicho muy importante en mi vida y también nos hemos apoyado mutuamente en esta etapa. A la Viejíz, la Baca y los Xunos por quererme y haber formado parte del proceso. Sin duda se me queda gente en el tintero, a esa gente gracias igual.

Finalmente, gracias a la vida por darme la oportunidad de estar en Beauchef, fue duro y muy cuesta arriba pasar por acá, pero he aprendido mucho de la vida. Quizás ha sido más significativo en el ámbito personal que en lo profesional y agradezco haber tomado este camino. ¡Muchas gracias!

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	ii
Agradecimientos.....	iv
1 Introducción	1
1.1 Formulación del estudio propuesto	1
1.2 Área de estudio	7
1.2.1 Ubicación y vías de acceso	7
1.2.2 Clima	8
1.3 Objetivos	9
1.3.1 Objetivo general.....	9
1.3.2 Objetivos específicos.....	9
1.4 Hipótesis de trabajo.....	10
1.5 Uso directo de la geotermia en Chile	10
2 Antecedentes generales	12
2.1 Gravimetría de la zona de estudio	14
2.2 Geología.....	16
2.2.1 Rocas estratificadas	17
2.2.2 Depósitos no consolidados.....	17
2.3 Recursos de agua subterránea	18
2.3.1 Definición de acuíferos y sus propiedades (Pérez <i>et al.</i> , 2014).....	21
2.4 Propiedades hidráulicas de interés	22
2.4.1 Porosidad	22
2.4.2 Conductividad hidráulica.....	23
2.4.3 Ley de Darcy.....	23
2.5 Pruebas de bombeo	24
2.5.1 Transmisividad.....	25
2.5.2 Abatimiento.....	25
2.5.3 Ensayos de Bombeo.....	26
2.6 Temperatura en aguas subterráneas	26
2.7 Comportamiento termal del suelo.	27
2.7.1 Difusividad termal	28
2.8 Plan regulador.....	29
2.8.1 Coeficiente de ocupación de suelo	29
2.8.2 Edificaciones.....	30

2.8.3	Equipamientos.....	30
2.9	Bombas de calor geotermales.....	30
2.9.1	Bomba de calor.....	30
2.9.2	Sistema de distribución de calefacción/enfriamiento	31
2.9.3	Sistemas de conexión a tierra.....	32
2.10	Coeficiente de Rendimiento (COP).....	35
2.11	Limitantes.....	36
2.11.1	Limitantes económicas	36
2.11.2	Limitantes legales.....	37
3	Metodología.....	40
3.1	Terreno.....	40
3.1.1	Trabajo previo.....	40
3.1.2	Trabajo en terreno	40
3.2	Propiedades hidrogeológicas	40
3.2.1	Niveles estáticos y cotas hidráulicas	41
3.2.2	Distribución de sedimentos.....	41
3.2.3	Conductividad hidráulica y transmisividad	42
3.2.4	Dirección del flujo de aguas subterráneas, gradiente hidráulico y velocidad real.	42
3.2.5	Temperatura del agua subterránea	43
3.3	Propiedades térmicas del suelo	43
3.3.1	Parámetros termales	43
3.3.2	Potencial de extracción de calor específico.....	43
3.3.3	Estimación de la temperatura del suelo.....	44
3.4	Demanda térmica.....	45
3.5	Sistemas de información geográfica (SIG).....	46
3.6	Sistemas horizontales cerrados	46
3.7	Sistemas verticales abiertos.....	47
3.8	Sistemas verticales cerrados	48
3.9	Herramienta de decisión	49
4	Resultados.....	50
4.1	Propiedades hidrogeológicas	50
4.1.1	Base de datos.....	50
4.1.2	Perfiles geológicos esquemáticos.....	50
4.1.3	Niveles estáticos.....	56
4.1.4	Cotas hidráulicas	56

4.1.5	Abatimiento y caudales.....	61
4.1.6	Transmisividad y conductividad hidráulica.....	61
4.1.7	Velocidad real.....	66
4.1.8	Perfiles de temperatura y conductividad eléctrica de aguas subterráneas.....	66
4.2	Zonificación de la ciudad de Osorno.....	70
4.2.1	Definición de tipologías de vivienda.....	72
4.2.2	Correlación de tipologías.....	73
4.2.3	Determinación de la demanda energética.....	74
4.3	Sistemas horizontales cerrados.....	78
4.3.1	Propiedades térmicas del suelo.....	78
4.3.2	Determinación del COP.....	80
4.3.3	Determinación del potencial de extracción del suelo.....	80
4.3.4	Superficie de intercambiadores horizontales.....	81
4.4	Sistemas verticales abiertos.....	83
4.4.1	Determinación del COP.....	83
4.4.2	Determinación de caudales y potencias obtenidas.....	84
4.4.3	Determinación de la potencia de extracción de calor del suelo y la potencia generada por una GWHP.....	84
4.4.4	Profundidad de perforación.....	85
4.5	Sistemas verticales cerrados.....	87
4.5.1	Determinación del potencial de extracción específico de calor (sHE).....	87
4.6	Evaluación de bombas de calor en Osorno.....	89
4.6.1	Sistemas horizontales cerrados.....	89
4.6.2	Sistemas verticales abiertos.....	89
4.6.3	Sistema vertical cerrado.....	90
4.7	Herramienta de decisión.....	94
5	Discusiones.....	98
6	Conclusiones.....	108
7	Bibliografía.....	110
8	Anexos.....	114
	Anexo 1: Uso residencial del suelo según PRC de Osorno.....	114
	Anexo 2: Industria chilena de bombas de calor.....	115
	Anexo 3: Materialidad de tipologías de vivienda.....	117
	Anexo 4: Distribución socioeconómica.....	119
	Anexo 5: Base de datos hidrogeológica.....	121
	Anexo 6: Base de datos de temperaturas medias diarias.....	125

Anexo 7: Estratigrafía de pozos profundos.	134
Anexo 8: Desviación estándar de la interpolación de temperaturas.	173
Anexo 9: Cotizaciones de bombas de calor	174

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Aumento de la utilización mundial de bombas de calor para uso directo entre los años 1995 y 2015. Fuente: Elaboración propia basada en el trabajo de Lund & Boyd (2016).....	1
Figura 2: Capacidad total instalada en Chile (22516,91 [MW]) distribuida en distintas fuentes de energía para los principales sistemas eléctricos del país hasta marzo de 2018. Fuente: http://energiaabierta.cl/visualizaciones/capacidad-instalada/	2
Figura 3: Promedio trianual de MP2,5 en estaciones de monitoreo. La ciudad de Osorno presenta una contaminación superior a los 30 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] para una norma de 20 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]. Fuente: elaboración propia basado en Ministerio del Medio Ambiente (2016).....	3
Figura 4: Promedio trianual de MP10 en ciudades de monitoreo. La ciudad de Osorno presenta una concentración aproximada a 45 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] respecto a una norma anual de 50 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]. Fuente: elaboración propia basado en Ministerio del Medio Ambiente (2016)...	4
Figura 5: Comparación porcentual del aporte de emisiones en diferentes fuentes de contaminantes atmosféricos en Osorno. Fuente: elaboración propia basado en Ministerio del Interior y Seguridad Pública (2016)	5
Figura 6: Catastro de artefactos ligados a la leña. Fuente: Elaboración propia con datos tomados de Ministerio del Interior y Seguridad Pública (2016).	6
Figura 7: Mapa de ubicación de la ciudad de Osorno, principales ríos y vías de acceso. Fuente: elaboración propia.....	7
Figura 8: Temperaturas medias anuales registradas entre los años 1988 y 2016 en la estación meteorológica Adolfo Matthei. Fuente: elaboración propia.	8
Figura 9: Temperaturas medias mensuales registradas entre los años 1988 y 2016 en la estación meteorológica Adolfo Matthei. Fuente: elaboración propia.	9
Figura 10: Distribución de proyectos identificados en el marco de proyecto por rubros. Fuente: Aguasol (2016).	11
Figura 11: Mapa esquemático de la ubicación de las subcuencas de Osorno y Llanquihue y su relación con el basamento metamórfico. En la figura sólo se presentan las fallas mayores que limitan a las cuencas y altos topográficos como el Alto del Río Negro. Estas fallas no alcanzarían la superficie. Fuente: Modificado de Elgueta <i>et al.</i> (2000).....	12
Figura 12: Ubicación de sondeos TEM realizados en el trabajo de Conic BF Ingenieros Civiles consultores LTDA. (2010). Dato TEM n°5 ubicado en el límite sureste de la ciudad de Osorno.....	13
Figura 13: Anomalía residual y modelo de capas para perfil. La figura superior muestra la anomalía residual obtenida del levantamiento de datos (puntos negros) y la anomalía residual calculada en función de la señal emitida por el modelo de capas. Fuente: Morales <i>et al.</i> (2015).	14
Figura 14: Mapa de ubicación de la geología de la cuenca del Río Maullín y Río bueno. a) Zona de estudio (escala 1:4200000) y límites de cuenca. b) Principales unidades geológicas (escala 1:500000), trazas de perfiles gravimétricos (líneas de puntos verdes),	

pozos (puntos fucsias) y principales ríos de la zona. Además, se señala la ciudad de Osorno y el perfil gravimétrico de interés. Fuente: Morales <i>et al.</i> (2015).	15
Figura 15: Geología de la zona de estudio (1:150.000). Fuente: Pérez <i>et al.</i> (2014). Presenta la ubicación de pozos profundos recopilados de la base de datos de la DGA (Dirección General de Aguas).	16
Figura 16: Cuencas y sectores definidos según su importancia económica en la X Región de Los Lagos. Hacia el norte se encuentra la cuenca del río Bueno donde se ubica el área de estudio en la ciudad de Osorno. Fuente: Dirección General de Aguas (2010).	19
Figura 17: Hidrogeología de la zona Osorno (1:150.000). Fuente: Pérez <i>et al.</i> (2014), Presenta la ubicación de pozos profundos encontrados en la base de datos de la DGA.	20
Figura 18: Comportamiento de la porosidad total y efectiva en función de la granulometría del suelo. Fuente: Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (2009) basado en Custodio & Llamas (1983).	23
Figura 19: Esquemas de bombeo para acuíferos libres y confinados. El descenso del nivel piezométrico inicial hacia uno dinámico se conoce como el cono de bombeo. Fuente: Gonzalez de Vallejo (2002)	25
Figura 20: Variaciones estacionales de perfiles de temperatura en aguas subterráneas. A la izquierda, perfiles correspondientes a zonas de recarga y en la derecha a zonas de descarga. Modificado de (Anderson, 2005).	27
Figura 21: Comportamiento térmico del suelo para profundidades próximas a la superficie (entre 0 y 4 [m].). Fuente: Andújar <i>et al.</i> (2016).	28
Figura 22: Zonificación del Plan Regulador Comunal modificado de Osorno En la figura se definen las siguientes macro áreas: E: zonas especiales, R: zonas de restricción, H: zonas residenciales y C: zonas comerciales y residenciales ligadas al Centro. Fuente. http://ide.cl/descargas/capas/minvu/PRC-Los_Lagos.rar	29
Figura 23: Ciclo de funcionamiento de una bomba de calor. Fuente: Modificado de RETScreen International (2005).	31
Figura 24: Intercambiadores en sistemas horizontales cerrados (GCHPs). Fuente: Modificado de RETScreen International (2005).	33
Figura 25: Intercambiadores verticales cerrados según el tipo de tubería. En a, un sistema de tubos simple con forma de U. En b, un sistema coaxial. Fuente: elaboración propia basado en RETScreen International (2005).	33
Figura 26: Intercambiadores en sistemas verticales cerrados (GCHPs). Modificado de RETScreen International (2005).	34
Figura 27: Intercambiadores en sistemas verticales abiertos (GWHPs). Modificado de (RETScreen International, 2005).	35
Figura 28: Restricciones a los derechos de agua en la zona norte de la X Región. Fuente: www.dga.cl	38
Figura 29: Porcentaje de viviendas con agua a través de pozos profundos o norias para cada sector de Osorno. Basado en el Censo 2002.	39

Figura 30: Sistema de clasificación de Shepard, recomendado para la clasificación de sedimentos (Shepard, 1954).	42
Figura 31: Vista en planta de las secciones esquemáticas A, B, C y D y ubicación de los pozos utilizados para realizar dichas secciones (Escala:1:150000). Fuente: elaboración propia.	51
Figura 32: Sección geológica esquemática A orientada de oeste a este en el sector norte de la zona de estudio. Línea verde en la figura 31. Fuente: elaboración propia.	52
Figura 33: Sección geológica esquemática B orientada de oeste a este en el sector sur de la zona de estudio. Línea negra en la figura 31. Fuente: elaboración propia.	53
Figura 34: Sección geológica esquemática C orientada de norte a sur en el sector oeste de la zona de estudio. Línea morada en la figura 31. Fuente: elaboración propia.	54
Figura 35: Sección geológica esquemática D orientada de norte a sur en el sector este de la zona de estudio. Línea azul en la figura 31. Fuente: elaboración propia.....	55
Figura 36: Mapa de interpolación de niveles estáticos en acuíferos libres A1 y B dentro de la zona de Osorno (1:150.000).....	57
Figura 37: Mapa de interpolación de niveles estáticos en el acuífero //A2 dentro de la zona de Osorno (1:150.000).	58
Figura 38: Mapa de interpolación de cotas hidráulicas y dirección del flujo de agua (flechas) en acuíferos libres A1 y B (1:150.000).....	59
Figura 39: Mapa de interpolación de cotas hidráulicas y dirección del flujo de agua (flechas) en acuífero //A2 (1:150.000).	60
Figura 40: Mapa de caudales (Q) concedidos en captaciones de pozos profundos para la zona de Osorno (1:150.000). Para cada caso se distingue sobre que unidad se capta agua (leyenda de color). Fuente: elaboración propia con datos recopilados de la DGA.	62
Figura 41: Mapa de abatimientos en captaciones de pozos profundos en la zona de Osorno (1:150.000). Para cada caso se distingue sobre que unidad se capta agua (leyenda de color). Fuente: elaboración propia con datos recopilados de la DGA.	63
Figura 42: Mapa de transmisividad (T) de captaciones de pozos profundos en la zona de Osorno (1:150.000). Para cada caso se distingue sobre que unidad se capta agua (leyenda de color). Fuente: elaboración propia con datos recopilados de la DGA.	64
Figura 43: Mapa de conductividad hidráulica (K) en captaciones de pozos profundos en la zona de Osorno (1:150.000). Para cada caso se distingue sobre que unidad se capta agua (leyenda de color). Fuente: elaboración propia con datos recopilados de la DGA.	65
Figura 44: Distribución de la velocidad real (v_r) en Osorno, para identificar la presencia de flujos fuertes de agua subterránea ($>0,2$ [m/día]) (1:150.000).	67
Figura 45: Perfiles de temperatura y conductividad eléctrica en aguas subterráneas medidos en terreno. a) Pozo: Os101. b) Pozo: Os201. c) Pozo: Os203. d) Pozo: Os204.	68

Figura 46: Perfiles de temperatura y conductividad eléctrica de aguas subterráneas medidos en terreno. e) Pozo: Os205. f) Pozo: Os301. g) Pozo: Os302. h) Pozo: Os304.	68
Figura 47: Mapa de distribución de temperaturas de aguas subterráneas en Osorno (1:75.000). Se destacan aquellos pozos en donde se pudo medir el perfil de temperaturas (puntos verdes) y aquellos en que se midió desde la superficie (puntos azules).	69
Figura 48: Rezonificación del Plan regulador comunal (PRC) de la ciudad de Osorno según zonas de interés.	71
Figura 49: Zonificación de la potencia de la demanda ponderada a partir de las zonas de interés definidas en el PRC de Osorno (1:75.000).	77
Figura 50: Estimación de la temperatura del subsuelo a diferentes profundidades y temperatura ambiente diaria del año 2016.	78
Figura 51: Estimación del coeficiente de rendimiento (COP) para profundidades de emplazamiento de colectores horizontales a 1,5 [m] y 3 [m]; durante el año 2016.	80
Figura 52: Comparación entre la superficie estimada para instalar colectores horizontales cerrados que logren satisfacer un 60% demanda térmica total en cada tipología de viviendas y la superficie libre permitida para cada tipología según la normativa de cada zona de interés bajo un criterio de ocupación del suelo máximo.	83
Figura 53: Curva ajustada de percentiles de caudales otorgados mediante derechos de agua por la DGA.	84
Figura 54: Profundidad de perforación [m] estimada en la zona de Osorno para la implementación de intercambiadores verticales abiertos (GWHP) (1:150.000).	86
Figura 55: Interpolación del potencial de extracción de calor específico sHE [W/m] (1:150.000).	88
Figura 56: Zonificación de la ciudad de Osorno según el cumplimiento de la norma de superficies prediales mínimas (SPmín) para la implementación de sistemas horizontales cerrados (GCHP) (1:75.000). En la figura, se muestran las zonas de restricción donde el uso residencial de suelo no se permite. Para cada zona se detallan en que tipologías es factible instalar sistemas GCHP horizontales cerrados.	91
Figura 57: Zonificación de Osorno en función de la razón entre la demanda térmica y la potencia generada en cada zona de interés en sistemas verticales abiertos (GWHP) (1:75.000). Se considera una variación de la potencia generada en función de la diferencia de temperaturas (ΔT) y el caudal (Q). Cada zona posee un costo asociado a la perforación de un pozo de extracción y otro de reinyección, sumado al valor relacionado a la bomba de calor (caso 1).	92
Figura 58: Zonificación de Osorno según la profundidad de perforación necesaria para satisfacer la demanda térmica a partir del potencial específico de extracción de calor (sHE) en sistemas verticales cerrados (GCHP) (1:75.000). Cada zona asociada a un costo por perforación de pozos profundos y obtención de una bomba de calor.	93
Figura 59: Herramienta de decisión. Solución para suplir la demanda térmica de viviendas en diferentes zonas de Osorno, aplicando sistemas de bombas de calor geotermiales acopladas a diferentes intercambiadores (1:75.000). Cada zona presenta el costo de	

implementar aquel sistema que resulta más económico dada una tipología de vivienda.	95
Figura 60: Herramienta de decisión evaluando la opción de perforaciones en sistemas verticales abiertos hasta el acuífero //A2. Solución para demandas térmicas de viviendas en diferentes zonas de Osorno, mediante bombas de calor geotermales acopladas a diferentes intercambiadores (1:75.000). Cada zona, en la tabla, presenta el costo de implementar aquel sistema que resulta más económico según la tipología de vivienda.	96
Figura 61: Solución eficiente para suplir la demanda térmica en agrupaciones distritales de viviendas en diferentes zonas de Osorno, mediante la aplicación de bombas de calor geotermales acopladas a intercambiadores (1:75.000). Los sistemas distritales se conforman por grupos de viviendas según la cantidad de veces que la demanda térmica puede ser sustituida por sistemas verticales abiertos (GWHP), en caso contrario se plantean sistemas horizontales cerrados (GCHP).....	97
Figura 62: Esquema de distribución de unidades hidrogeológicas según la correlación de unidades definidas por Pérez (2014) y las secciones geológicas.	100
Figura 63:Gráfico de dispersión de caudales reales respecto a caudales teóricos para los diferentes pozos. La leyenda indica sobre qué pozos se encuentra la criba que capta el agua subterránea.	101
Figura 64: Análisis de sensibilidad de la velocidad real en función de la porosidad y la velocidad de Darcy.	103
Figura 65: Clasificación de la Población en función del estrato socioeconómico. Modificado de (CREARA, 2013). Fuente: Adimark. Investigaciones de Mercado y opinión pública 2007.	119
Figura 66: Mapa territorial, nivel educacional alcanzado. Fuente: Ilustre Municipalidad de Osorno (2013) basado en Censo 2002.	119
Figura 67:Mapa distribución de la población según ingresos. Fuente: Ilustre Municipalidad de Osorno (2013) basado en Censo 2002.	120
Figura 68: Leyenda de estratigrafía de pozos profundos publicados por la DGA y ubicación de cribas.....	134
Figura 69: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-889: 5506055 [m] S, 661084 [m] E, 56 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-4021: 5504645 [m] S, 661889 [m] E, 70 [m.s.n.m.].....	135
Figura 70: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3178: 5505395 [m] S, 655978 [m] E, 41 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-3340: 5507833 [m] S, 656901 [m] E, 65 [m.s.n.m.].....	136
Figura 71: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-993: 5511016 [m] S, 656799 [m] E, 70 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-994: 5504218 [m] S, 663061 [m] E, 68 [m.s.n.m.].....	137
Figura 72: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-1707: 5507674 [m] S, 660666 [m] E, 99 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-4184: 5506491 [m] S, 661093 [m] E, 57 [m.s.n.m.].....	138
Figura 73: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-1008: 5511243 [m] S, 658057 [m] E, 81 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-1072: 5503720 [m] S, 662756 [m] E, 68 [m.s.n.m.].....	139
Figura 74: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-1222: 5505412 [m] S, 661189 [m] E, 50 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-1469: 5501724 [m] S, 665707 [m] E, 83 [m.s.n.m.].....	140

Figura 75: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-1518: 5502242 [m] S, 666093 [m] E, 89 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-1820: 5502619 [m] S, 666595 [m] E, 95 [m.s.n.m.]..... 141

Figura 76: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3240: 5502850 [m] S, 658860 [m] E, 79 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-3063: 5503454 [m] S, 663559 [m] E, 77 [m.s.n.m.]..... 142

Figura 77: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3884: 5505746 [m] S, 659093 [m] E, 67 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-3885: 5505846 [m] S, 659140 [m] E, 68 [m.s.n.m.]..... 143

Figura 78: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3697: 5498670 [m] S, 656501 [m] E, 90 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-4204: 5506546 [m] S, 660855 [m] E, 50 [m.s.n.m.]..... 144

Figura 79: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-1032: 5508721 [m] S, 660455 [m] E, 84 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-1049: 5502794 [m] S, 667280 [m] E, 105 [m.s.n.m.]... 145

Figura 80: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-1237: 5508116 [m] S, 658683 [m] E, 64 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-1260: 5516745 [m] S, 666119 [m] E, 106 [m.s.n.m.]... 146

Figura 81: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-1277: 5509253 [m] S, 660793 [m] E, 91 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-1470: 5503315 [m] S, 665348 [m] E, 101 [m.s.n.m.]... 147

Figura 82: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-1521: 5507215 [m] S, 663897 [m] E, 97 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-1533: 5501928 [m] S, 651632 [m] E, 115 [m.s.n.m.]... 148

Figura 83: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-1535: 5503417 [m] S, 666078 [m] E, 97 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-1574: 5499438 [m] S, 659347 [m] E, 96 [m.s.n.m.]..... 149

Figura 84: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-1729: 5517259 [m] S, 666562 [m] E, 105 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-1861: 5509287 [m] S, 661040 [m] E, 90 [m.s.n.m.]..... 150

Figura 85: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-1889: 5504084 [m] S, 660969 [m] E, 88 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-2009: 5504973 [m] S, 660845 [m] E, 60 [m.s.n.m.]..... 151

Figura 86: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-2868: 5507412 [m] S, 653573 [m] E, 92 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-2869: 5507538 [m] S, 653834 [m] E, 91 [m.s.n.m.]..... 152

Figura 87: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-2980: 5502811 [m] S, 658657 [m] E, 84 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-2981: 5509385 [m] S, 670797 [m] E, 109 [m.s.n.m.]... 153

Figura 88: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3034: 5513783 [m] S, 667334 [m] E, 103 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-3043: 5499658 [m] S, 655848 [m] E, 98 [m.s.n.m.]..... 154

Figura 89: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3050: 5512046 [m] S, 657583 [m] E, 87 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-3104: 5513187 [m] S, 656521 [m] E, 108 [m.s.n.m.]... 155

Figura 90: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3153: 5503284 [m] S, 660267 [m] E, 90 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-3159: 5519521 [m] S, 666840 [m] E, 108 [m.s.n.m.]... 156

Figura 91: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3248: 5501302 [m] S, 662309 [m] E, 94 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-3249: 5503039 [m] S, 661528 [m] E, 85 [m.s.n.m.]..... 157

Figura 92: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3292: 5498804 [m] S, 660840 [m] E, 102 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-3310: 5503106 [m] S, 658847 [m] E, 66 [m.s.n.m.]..... 158

Figura 93: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3337: 5507486 [m] S, 664123 [m] E, 95 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-3459: 5510826 [m] S, 662559 [m] E, 92 [m.s.n.m.]..... 159

Figura 94: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3490: 5504581 [m] S, 661086 [m] E, 69 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-3533: 5515837 [m] S, 666161 [m] E, 104 [m.s.n.m.]... 160

Figura 95: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3568: 5503428 [m] S, 660730 [m] E, 90 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-3572: 5507742 [m] S, 664046 [m] E, 96 [m.s.n.m.]..... 161

Figura 96: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3577: 5506693 [m] S, 670482 [m] E, 112 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-3595: 5503651 [m] S, 659325 [m] E, 86 [m.s.n.m.]..... 162

Figura 97: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3705: 5505835 [m] S, 667752 [m] E, 107 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-3786: 5503716 [m] S, 660809 [m] E, 94 [m.s.n.m.]..... 163

Figura 98: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3902: 5508812 [m] S, 661065 [m] E, 91 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-4035: 5515325 [m] S, 665271 [m] E, 99 [m.s.n.m.]..... 164

Figura 99: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-828: 5510670 [m] S, 662450 [m] E, 86 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-918: 5510812 [m] S, 663225 [m] E, 97 [m.s.n.m.]..... 165

Figura 100: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-4036: 5514758 [m] S, 664210 [m] E, 96 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-4055: 5509826 [m] S, 661696 [m] E, 95 [m.s.n.m.]..... 166

Figura 101: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-4061: 5500968 [m] S, 662266 [m] E, 94 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-4107: 5503129 [m] S, 658388 [m] E, 80 [m.s.n.m.]..... 167

Figura 102: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-4150: 5503531 [m] S, 656098 [m] E, 91 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-4164: 5504084 [m] S, 660818 [m] E, 87 [m.s.n.m.]..... 168

Figura 103: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-4298: 5500400 [m] S, 659941 [m] E, 92 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-4317: 5514397 [m] S, 658966 [m] E, 99 [m.s.n.m.]..... 169

Figura 104: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-4341: 5508649 [m] S, 660269 [m] E, 79 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-4344: 5510253 [m] S, 659801 [m] E, 92 [m.s.n.m.]..... 170

Figura 105: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-4356: 5501011 [m] S, 662654 [m] E, 92 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-4358: 5499148 [m] S, 661762 [m] E, 99 [m.s.n.m.]..... 171

Figura 106: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-4591: 5510641 [m] S, 665931 [m] E, 95 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-4712: 5508240 [m] S, 659832 [m] E, 68 [m.s.n.m.]..... 172

Figura 107: Mapa de desviaciones estándar asociadas a la interpolación de datos de temperatura de la figura 47. 173

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Inventario de Emisiones de Osorno (Ton/año). Modificado de Ministerio del Interior y Seguridad Pública (2016)	5
Tabla 2: Estratigrafía geoelectrica del sondeo TEM n°5. Fuente: Conic BF Ingenieros Civiles consultores LTDA. (2010)	14
Tabla 3: Densidad considerada por el estudio de Morales <i>et al.</i> (2015) para cada unidad de la cuenca.....	14
Tabla 4: Valores de porosidad eficaz para distintos tipos de sedimento. Fuente: Custodio & Llamas (1983).	22
Tabla 5: Influencia de la conductividad hidráulica en parámetros termales de diferentes tipos de suelos. Fuente: Sarbu & Sebarchievici (2015)	23
Tabla 6: Difusividad termal para diferentes tipos de suelos. Modificado de Andújar <i>et al.</i> (2016).....	28
Tabla 7: Cotizaciones de diferentes modelos de bombas de calor en el mercado.....	36
Tabla 8: Cotizaciones de costos en millones de pesos chilenos para bombas de calor acopladas a sistemas horizontales cerrados sumado a costo de instalación.....	37
Tabla 9: Costos de perforación de pozos para la aplicación de bombas de calor acopladas a sistemas verticales. Fuente: Dirección General de Aguas (2013).....	37
Tabla 10: Valores típicos de sHE para diferentes tipos de sedimentos. Fuente: Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2004).....	44
Tabla 11: Valores típicos del potencial de extracción de calor de una superficie para diferentes tipos de suelo. Fuente: Pipelife (2015).	44
Tabla 12: Mediciones de temperatura en pozos desde la superficie por activación de la bomba.	66
Tabla 13: Rezonificación según el Plan Regulador Comunal (PRC) de Osorno previo al 2007 y la Ordenanza local del 2007. Sistemas de agrupamiento permitidos: continuo (C), pareado (P) y aislado (A). Limitantes superficiales: superficie predial mínima (SPmín) y coeficiente de ocupación de suelo (COs).....	70
Tabla 14: Definición de tipologías de viviendas típicas chilenas (UNTEC, 2014). Agrupamientos: continuo(C), pareado (P) y aislado (A).	72
Tabla 15: Definición de tipologías de viviendas asociadas a la ciudad de Osorno (CREARA, 2013). Agrupamiento: aislado (A), continuo (C) y pareado (P).....	72
Tabla 16: Porcentaje de tipologías de viviendas en Osorno construidas en diferentes periodos según el informe CREARA (2013).....	73
Tabla 17: Correlación entre estratos socioeconómicos y zonas de interés. Definición de estratos socioeconómicos según Asociación Chilena de Empresas de Investigación de Mercado (AIM) (2008).	73
Tabla 18: Correlación entre tipologías definidas en la UNTEC (2014) y CREARA (2013).	74

Tabla 19: Correlación entre zonas de interés del PRC y tipologías de viviendas UNTEC (2014) y porcentaje de ocurrencia en cada zona según el tipo de agrupamiento (aislado (A), pareado (P) y continuo (C)).	74
Tabla 20: Potencias y demandas superficiales promedio de cada periodo de restricción térmica en Osorno. Fuente: UNTEC (2014).	75
Tabla 21: Demanda energética medida en [kWh] asociada a cada tipología por periodo de restricción térmica.	75
Tabla 22: Potencia demandada según tipología de vivienda y periodo normativo para 2562 horas/año.	76
Tabla 23: Potencia de la demanda ponderada en cada zona de interés.	76
Tabla 24: Parámetros usados para modelar la temperatura del subsuelo: Temperatura mensual (T_m), amplitud o semidiferencia entre temperatura máxima y mínima (A_s), frecuencia angular (w), fase y difusividad termal (α).	78
Tabla 25: Detalle de las mediciones de parámetros térmicos de suelo realizadas en terreno.	79
Tabla 26: Valores de COP y temperatura del subsuelo a diferentes profundidades de emplazamiento para colectores horizontales cerrados.	80
Tabla 27: Potencia extraída del suelo [kW] para satisfacer una demanda térmica total y el 60% de esta para COP estimados a 1,5 [m] y 3 [m].	81
Tabla 28: Superficie libre estimada [m^2] para satisfacer la demanda termal total y su 60%, para COP estimados a 1,5 [m] y 3 [m]. Se considera un valor de potencial específico de extracción de calor del suelo de 20 [W/m^2].	81
Tabla 29: Superficie libre [m^2] permitida para la instalación de colectores horizontales cerrados en cada tipología de vivienda considerando un coeficiente de ocupación del suelo máximo en cada zona del PRC de Osorno.	82
Tabla 30: Tipologías de vivienda que poseen una superficie total mayor que la superficie predial mínima en cada zona del PRC. Aquellas celdas indicadas por un “Si” corresponden a los casos favorables.	83
Tabla 31: Percentiles de la población de caudales. Cálculo de la potencia de extracción de calor en agua subterránea para diferencias de temperaturas de 5 [K] y potencia generada por una bomba de calor en sistemas verticales abiertos (GWHP) para COP máximo y mínimo.	85
Tabla 32: Percentiles de la población de caudales. Cálculo de la potencia de extracción de calor en agua subterránea para diferencias de temperaturas de 3 [K] y potencia generada por una bomba de calor en sistemas verticales abiertos (GWHP) para COP máximo y mínimo.	85
Tabla 33: Estadística descriptiva de la distribución del potencial de extracción de calor específico sHE [W/m] en cada zona de interés del PRC de Osorno	87
Tabla 34: Cuadro comparativo entre la profundidad de perforación para disponer del recurso hídrico y sus costos ligados a perforación de dos niveles y la implementación de una bomba de calor. El primer caso contempla al nivel estático y el segundo al techo del acuífero //A2.	90

Tabla 35: Profundidad [m] de perforación estimada para conseguir una potencia equivalente al 60% de la demanda térmica en cada zona de interés mediante GCHP verticales. Se incluye el costo asociado.	90
Tabla 36: Uso residencial de suelo en las diferentes zonas del PRC de Osorno según la Ordenanza Local del 2007.	114
Tabla 37: Empresas nacionales de distribución de bombas de calor. Fuente: Aiguasol (2016).....	115
Tabla 38: Materialidad de las viviendas consideradas por el informe de la UNTEC para calcular las ganancias y pérdidas térmicas para determinar la demanda (Tipología 1).	117
Tabla 39: Materialidad de las viviendas consideradas por el informe de la UNTEC para calcular las ganancias y pérdidas térmicas para determinar la demanda (Tipologías 3 y 6).	117
Tabla 40: Materialidad de las viviendas consideradas por el informe de la UNTEC para calcular las ganancias y pérdidas térmicas para determinar la demanda (Tipología 4).	118
Tabla 41: Materialidad de las viviendas consideradas por el informe de la UNTEC para calcular las ganancias y pérdidas térmicas para determinar la demanda (Tipologías 5 y 7).	118
Tabla 42: Base de datos hidrogeológica. Q: caudal, NE: nivel estático, ND: nivel dinámico, CH: cota hidráulica, T: transmisividad, K: conductividad hidráulica, Vr: velocidad real, i: gradiente hidráulico y Qt: caudal teórico.	121
Tabla 43: Base de datos de temperaturas ambientales y del suelo a diferentes profundidades en Osorno.	125
Tabla 44: Cotización de Bombas de calor ODEN geotermia en Chile.....	174
Tabla 45: Resumen oferta de bomba de calor 15,5 [kW] BB solutions. Ingeniería y tecnología alemana.	174
Tabla 46: Resumen oferta de bomba de calor 18,3 [kW] BB solutions. Ingeniería y tecnología alemana.	174
Tabla 47: Cotización de Bombas de calor GeoGrow.....	175

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Formulación del estudio propuesto

En este trabajo se denomina energía geotermal de baja entalpía a los recursos subterráneos cuya temperatura no es lo suficientemente alta para generar electricidad. Esta energía se almacena en la Tierra en la forma de calor sensible¹. Proviene de la interacción entre el suelo cercano a la superficie y la atmósfera, mediante la absorción de radiación solar (Chow *et al.*, 2011). También existe un aporte menos significativo de flujos de calor ascendentes provenientes de rocas del basamento.

Las bombas de calor geotérmicas GSHPs (según sus siglas en inglés, *Ground Source Heat Pumps*) utilizan suelo o agua subterránea como fuente/sumidero de calor para proveer la climatización de espacios, con una eficiencia superior a la de sistemas tradicionales de aire acondicionado y de bajo impacto ambiental. La aplicación de GSHPs en uso directo tiene una capacidad energética instalada de 70,9% a nivel mundial y un uso anual energético de 55,15%, respecto de otras aplicaciones de GSHPs. La capacidad instalada es de 50258 [MW] y el uso anual de energía de 326848 [TJ/año] (Lund & Boyd, 2016). El uso de bombas de calor ha crecido considerablemente en los últimos 23 años (figura 1).

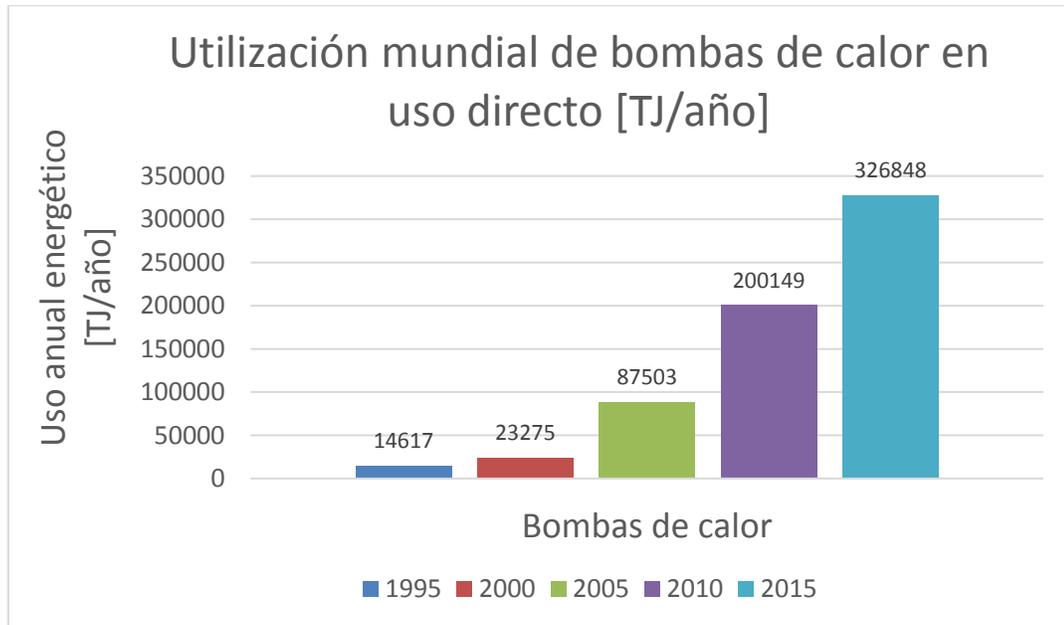


Figura 1: Aumento de la utilización mundial de bombas de calor para uso directo entre los años 1995 y 2015. Fuente: Elaboración propia basada en el trabajo de Lund & Boyd (2016).

La energía que requiere un sistema de GSHPs se obtiene desde el suelo o del agua subterránea y es trasladada mediante un sistema acoplado de intercambiadores de calor geotérmicos GSHE (según sus siglas en inglés, *Ground Source Heat Exchanger*). El

¹ Es la energía calórica que recibe un cuerpo haciendo que aumente su temperatura sin alterar su estructura molecular y, por lo tanto, su estado de la materia.

transporte de calor es mediante la circulación de un fluido dentro de tuberías. Dependiendo de la configuración de los GSHE y las condiciones que caracterizan a la fuente, se pueden extraer diferentes potencias, impactando en la eficiencia de la GSHP.

La principal fuente de energía utilizada en Chile corresponde a combustibles fósiles (figura 2) tales como: gas natural, petróleo o carbón; los que se obtienen en un 95% vía importación (Ministerio de Energía, 2015). En consecuencia, se genera un alto grado de contaminación atmosférica donde los principales contaminantes son: dióxido de carbono (CO₂), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), material particulado (MP), monóxido de carbono (CO), ozono (O₃) y plomo (Pb) (Ministerio del Medio Ambiente, 2012).

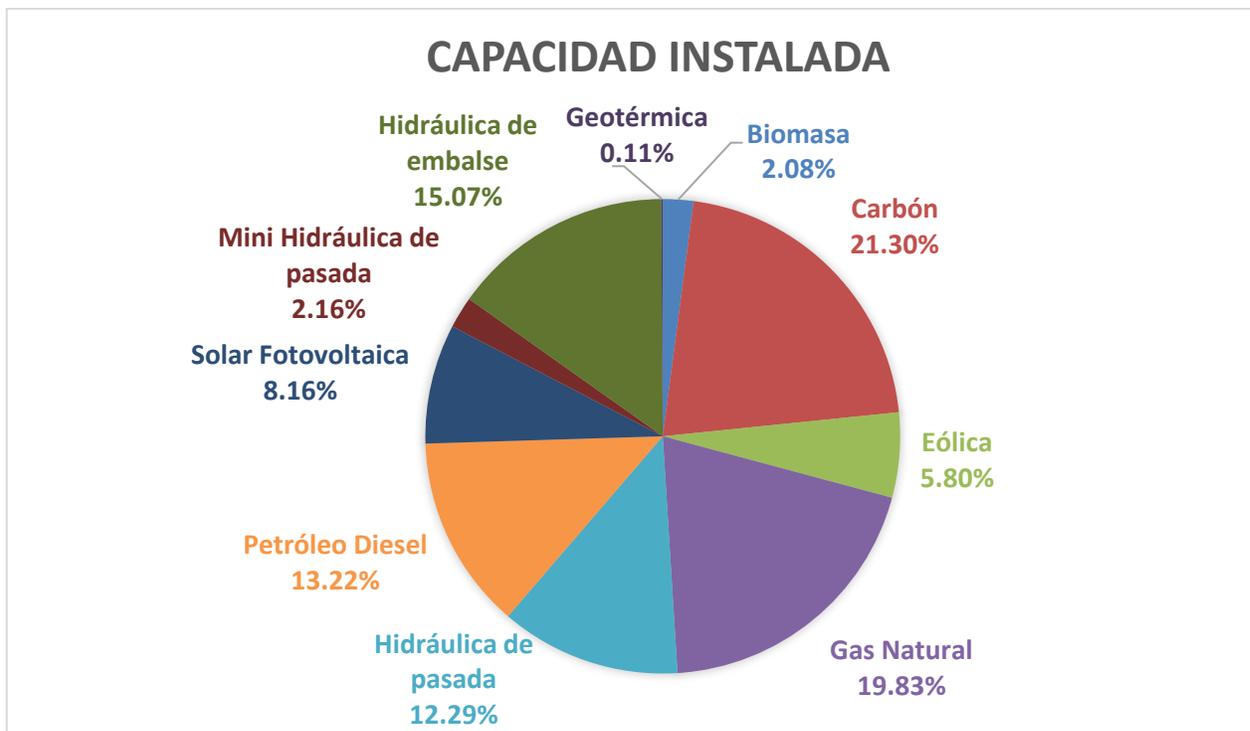


Figura 2: Capacidad total instalada en Chile (22516,91 [MW]) distribuida en distintas fuentes de energía para los principales sistemas eléctricos del país hasta marzo de 2018. Fuente: <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/capacidad-instalada/>

En Chile, la contaminación atmosférica es uno de los principales desafíos en temáticas del medio ambiente. La concentración de material particulado (MP) excede las normas anuales en un gran número de ciudades del sur de Chile. En la figura 3 y 4, se muestran concentraciones de MP (MP_{2,5} y MP₁₀ para las partículas de tamaño menor a 2.5 y 10 micras respectivamente) en diferentes ciudades de Chile (Ministerio del Medio Ambiente, 2016), evidenciando que la concentración de contaminantes atmosféricos es elevada, lo que es congruente con el crecimiento de las ciudades. Por esto, el Gobierno de Chile ha comenzado a impulsar planes de prevención y de descontaminación atmosférica.

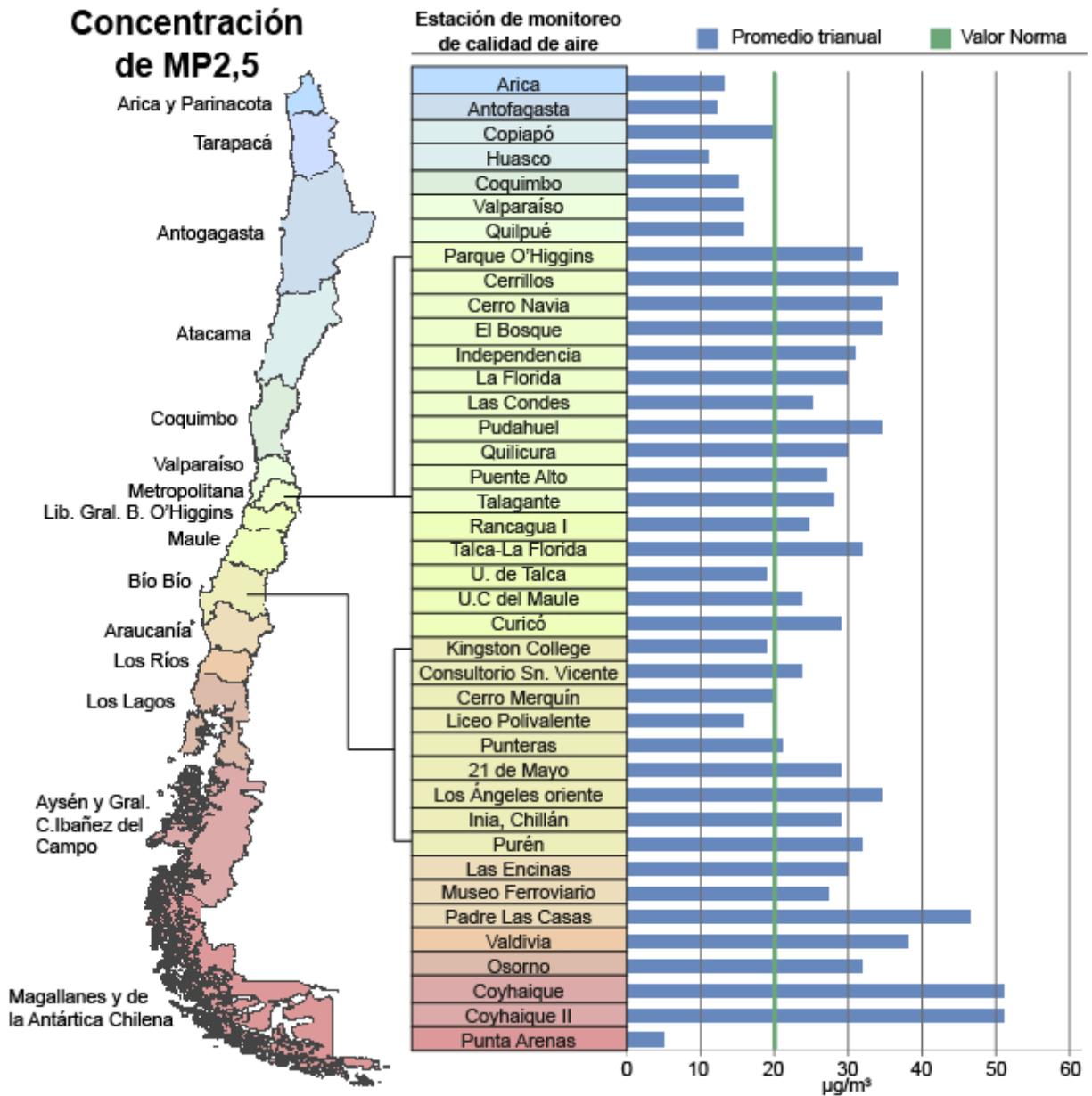


Figura 3: Promedio trienal de MP2,5 en estaciones de monitoreo. La ciudad de Osorno presenta una contaminación superior a los 30 [µg/m³] para una norma de 20 [µg/m³]. Fuente: elaboración propia basado en Ministerio del Medio Ambiente (2016).

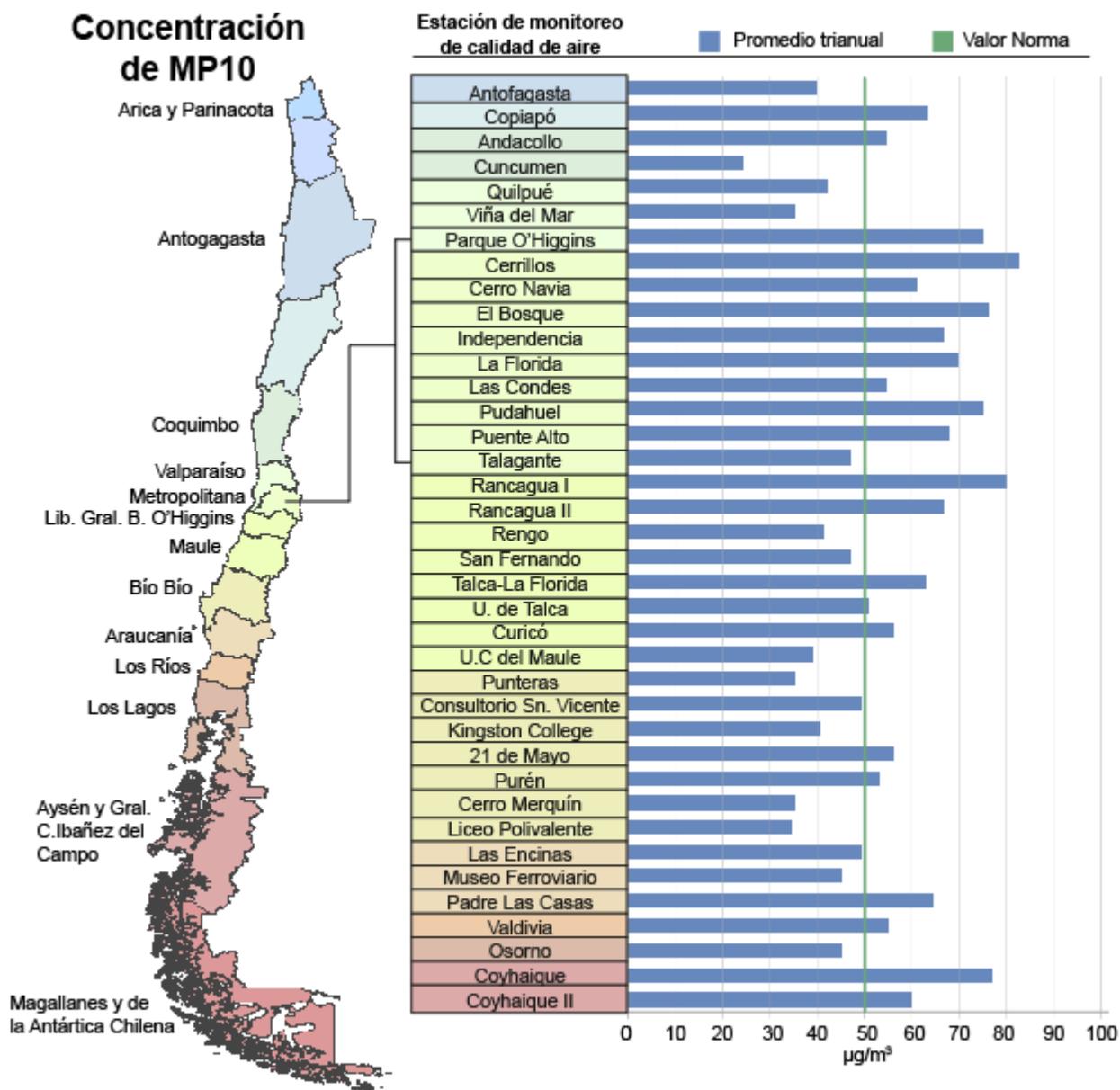


Figura 4: Promedio trianual de MP10 en ciudades de monitoreo. La ciudad de Osorno presenta una concentración aproximada a 45 [µg/m³] respecto a una norma anual de 50 [µg/m³]. Fuente: elaboración propia basado en Ministerio del Medio Ambiente (2016).

La ciudad de Osorno ha sido declarada como zona saturada en el Decreto Supremo N°27 de 2013 (Ministerio del Medio Ambiente, 2014). La principal fuente de contaminación atmosférica proviene desde el sector residencial y tiene su origen en la combustión de leña ligada a calefacción, agua caliente sanitaria y cocina. Además, hay un aporte de contaminantes procedentes de la actividad industrial, del transporte y de actividades relacionadas a las quemas. Las emisiones de MP y otros contaminantes generan altos niveles de toxicidad y patrones de exposición que ponen en riesgo la salud de la población (Ministerio del Interior y Seguridad Pública, 2016).

Las principales fuentes emisoras de contaminación son presentadas en la tabla 1. Se observa que la leña es la principal fuente emisora de MP y otros contaminantes atmosféricos (figura 5). En este mismo estudio se caracterizan los artefactos que

combustionan específicamente leña, se desprende que de 49.756 artefactos, cerca del 50% se utiliza para calefacción (figura 6). Según un estudio realizado por CREARA (2013), la Ilustre Municipalidad de Osorno ha determinado que el consumo de leña asciende aproximadamente hasta las 229.960 [ton/año], un 94,7% de esta corresponde a leña húmeda y un 93% proviene de leñeras no certificadas.

Tabla 1: Inventario de Emisiones de Osorno (Ton/año). Modificado de Ministerio del Interior y Seguridad Pública (2016)

Fuentes emisoras	MP10	MP2,5	SO₂	NO_x	NH₃	CO
Combustión residencial de leña	9740	9462	66	428	362	250852
Quemas e Incendios	173	162	28	68	4	1268
Fuentes Fijas	399	215	739	409	0	378
Móviles en Ruta	33	29	3	723	14	3180
Fugitivas	625	93	0	0	0	0
Total	10970	9961	836	1628	380	255678

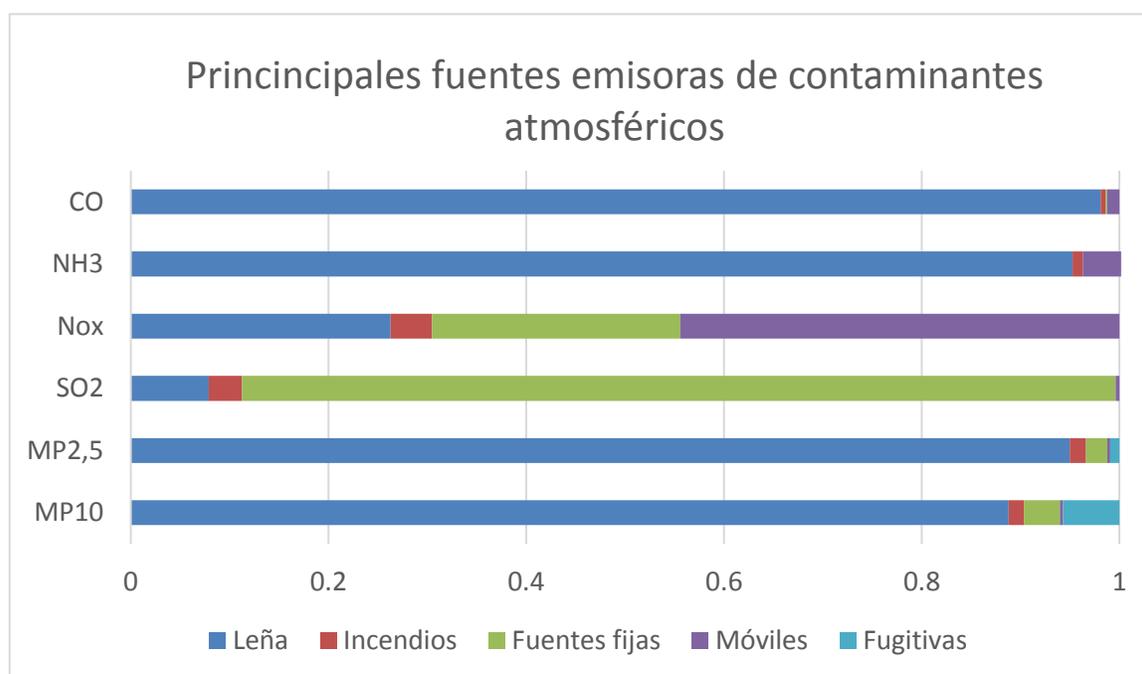


Figura 5: Comparación porcentual del aporte de emisiones en diferentes fuentes de contaminantes atmosféricos en Osorno. Fuente: elaboración propia basado en Ministerio del Interior y Seguridad Pública (2016)

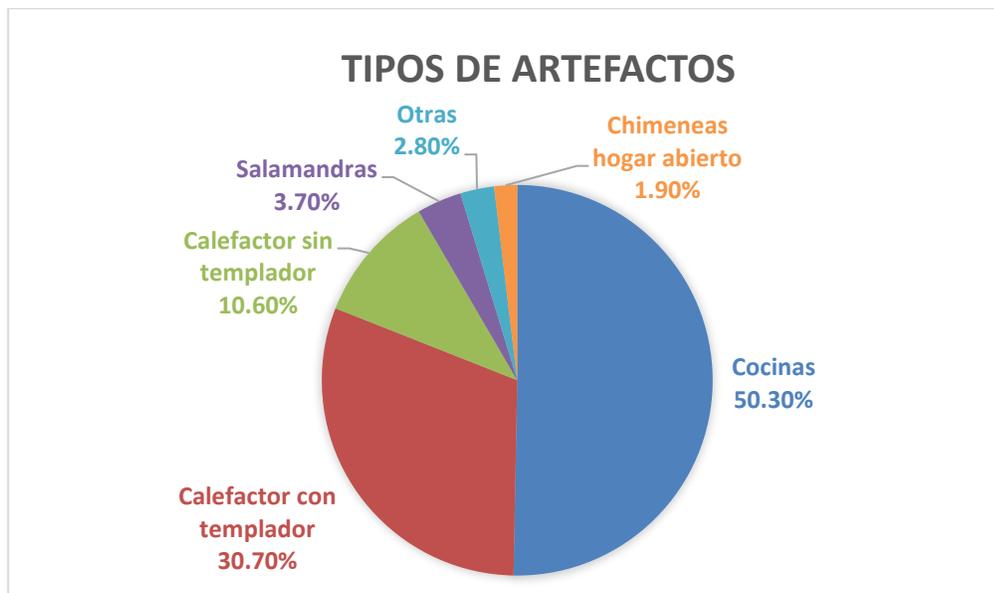


Figura 6: Catastro de artefactos ligados a la leña. Fuente: Elaboración propia con datos tomados de Ministerio del Interior y Seguridad Pública (2016).

Según Schield *et al.* (2016), el potencial geotérmico puede ser evaluado mediante una metodología desarrollada en una herramienta de Sistemas de Información Geográfica (SIG), realizando un muestreo que señale la aplicación de bombas de calor en determinadas parcelas definidas para algún tipo de asentamiento urbano. De este modo, se puede calcular qué porcentaje de la demanda energética destinada a la calefacción puede ser suplida por energía geotermal.

Mediante datos georreferenciados, se propone construir mapas en SIG que funcionen como una herramienta de decisión para determinar la distribución óptima de bombas de calor geotérmicas acopladas a GSHE, en concordancia con el Plan Regulador Comunal vigente en la ciudad de Osorno. Finalmente, se estima la energía geotermal disponible para implementar GSHPs y, así evaluar su capacidad de suplir la demanda energética de la ciudad de Osorno.

1.2 Área de estudio

1.2.1 Ubicación y vías de acceso

La comuna de Osorno se encuentra ubicada en la Región de Los Lagos entre los 40°21'S y los 40°46'S y los 73°46'W y 72°46'W a una altura media de 65 metros sobre el nivel del mar. De acuerdo con los registros del Censo 2012 presentados por la Secretaría Comunal de Planificación (CLIODINAMICA, asesorías, consultoría e ingeniería LTDA., 2013), Osorno cuenta con una cantidad de 154.137 habitantes y con de 951,3 [km²] de superficie, correspondiente al 2% de la superficie de la Región de Los Lagos.

La ciudad se encuentra ubicada 110 km al norte de la Capital Regional Puerto Montt y 940 km al sur de la ciudad de Santiago, siendo la Ruta 5 o Panamericana Sur su principal vía de acceso por el sector este de la ciudad. También se puede acceder por las rutas alternativas: U-16, U-22, U72, U-55-V y la Ruta 215 (figura 7). Se encuentra limitada hacia el norte por la comuna de San Pablo, al sur por Río Negro, al oeste por San Juan de la Costa y al este por Puerto Octay y Puyehue.

Existen dos ríos relacionados directamente a la ciudad: el Río Damas con un caudal menor y un flujo en dirección este-oeste y el Río Rahue que se desplaza de sur a norte (figura 7).

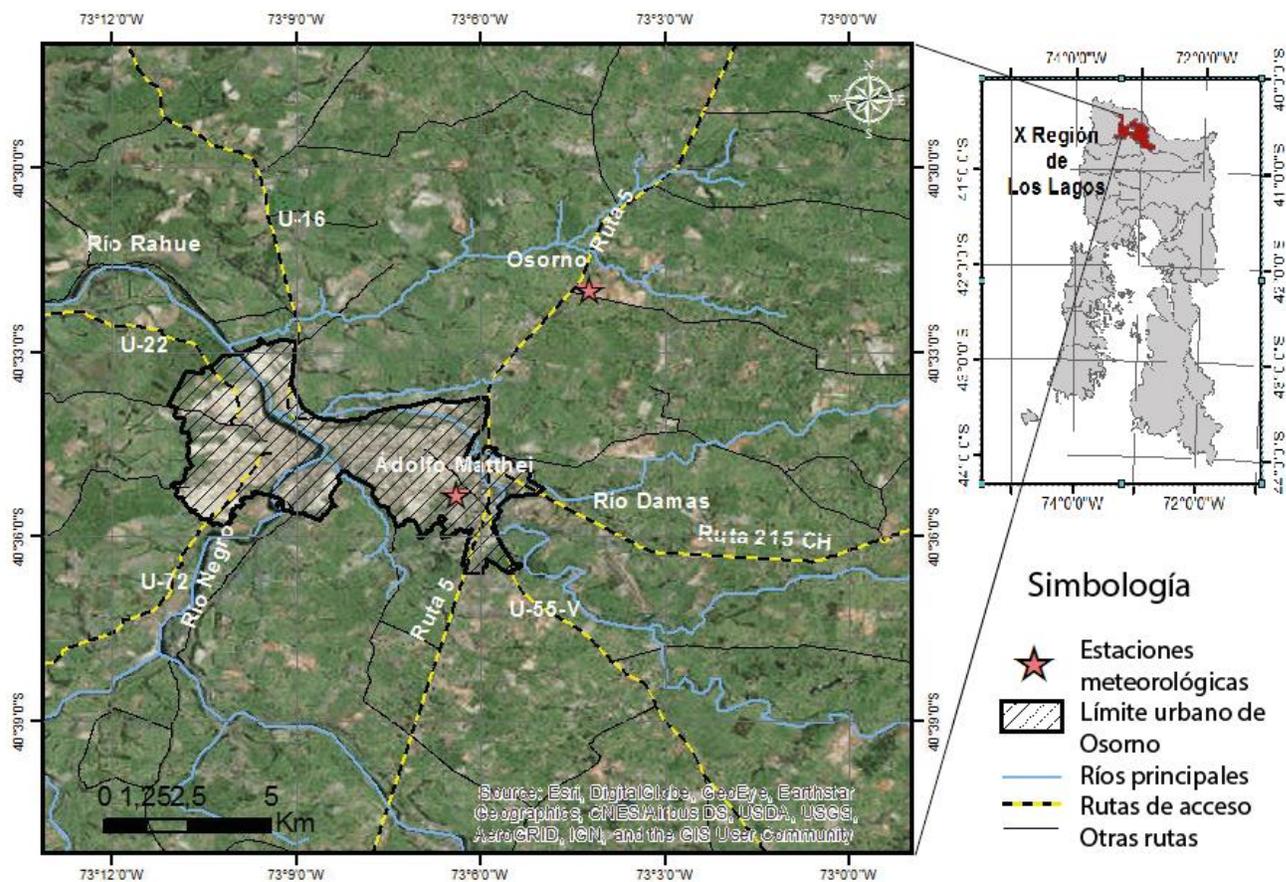


Figura 7: Mapa de ubicación de la ciudad de Osorno, principales ríos y vías de acceso. Fuente: elaboración propia.

1.2.2 Clima

El clima es de templado a húmedo. La zona se caracteriza por ser lluviosa, llegando a presentar precipitaciones de 1500 [mm/año]. La temperatura anual media es de 11.3 [°C] y alcanza medias de hasta 20 [°C] entre noviembre y marzo (CLIODINAMICA, asesorías, consultoría e ingeniería LTDA., 2013). Según el Instituto Nacional de Estadísticas (2015), la zona presenta un clima templado cálido lluvioso con cierta influencia mediterránea caracterizada por una temperatura media anual baja con oscilaciones térmicas diarias que tienden a ser fuertes; también existe una alta pluviosidad y homogeneidad en la repartición de lluvias. Además, hay una estación relativamente seca pero fresca en la época estival. En las figuras 8 y 9 se presentan datos históricos de las temperaturas medias anuales y mensuales registradas en el período de 1988 a 2016. Estos datos fueron tomados de los datos publicados por la Dirección General de Aguas en la estación meteorológica Adolfo Matthei, ubicada en el sector este de Osorno (figura 7).

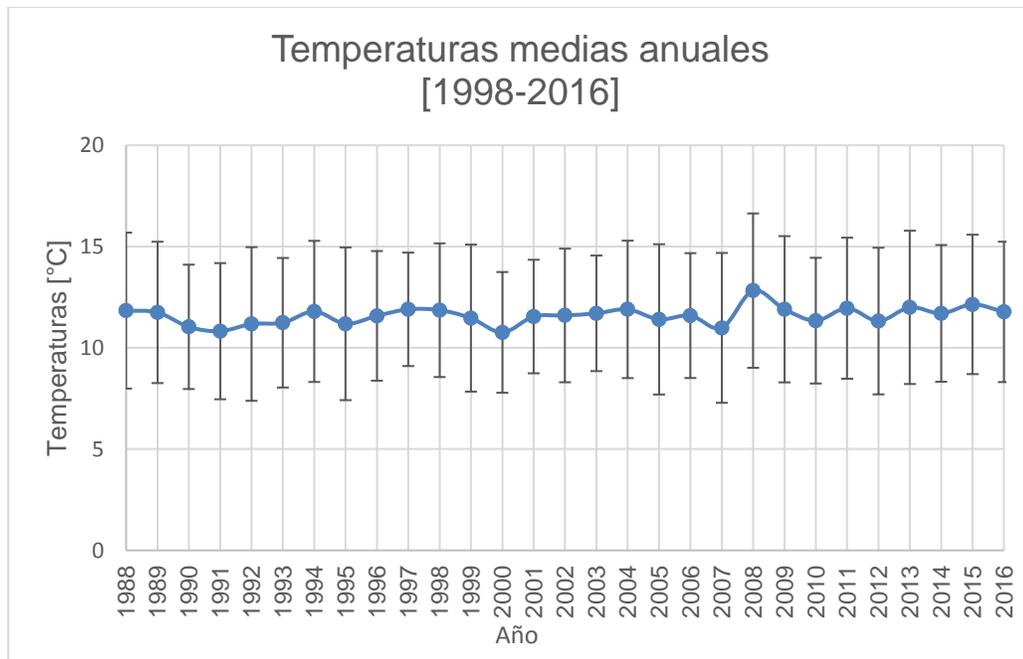


Figura 8: Temperaturas medias anuales registradas entre los años 1988 y 2016 en la estación meteorológica Adolfo Matthei. Fuente: elaboración propia.

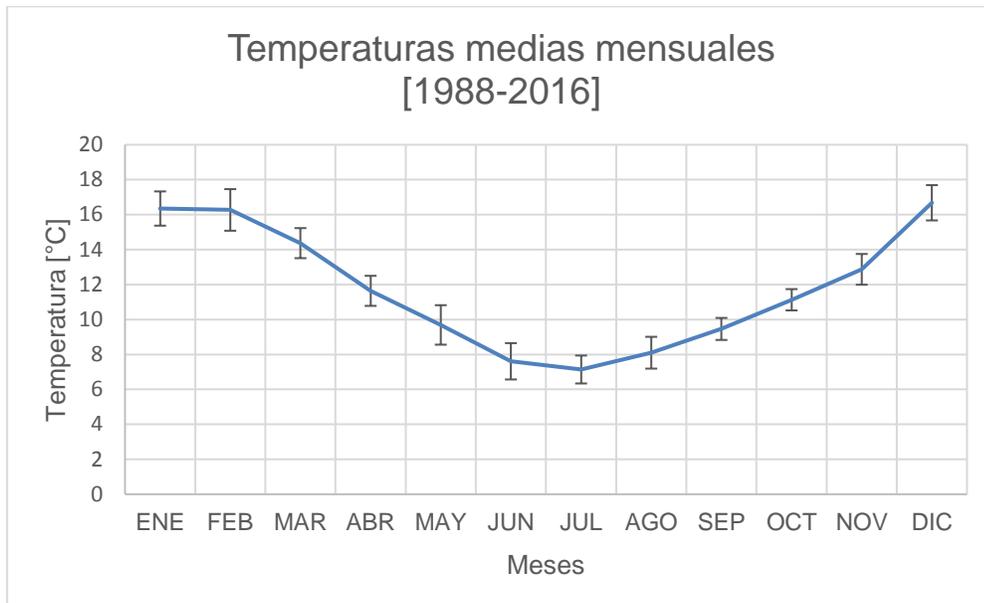


Figura 9: Temperaturas medias mensuales registradas entre los años 1988 y 2016 en la estación meteorológica Adolfo Matthei. Fuente: elaboración propia.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el potencial geotérmico y la demanda térmica para la zonificación de la ciudad de Osorno optimizando la aplicación de bombas de calor geotermiales.

1.3.2 Objetivos específicos

- Calcular los parámetros hidrogeológicos y termales del suelo y del agua subterránea en la zona de estudio.
- Estimar la demanda térmica para calefacción de diferentes tipologías de vivienda en la ciudad de Osorno.
- Determinar el potencial energético extraíble de las fuentes de calor características para cada sistema de intercambiadores de calor geotermiales.
- Construir un mapa, de escala 1:75.000, de la ciudad de Osorno zonificada según el porcentaje de demanda térmica que se puede satisfacer mediante el potencial energético extraíble con bombas de calor acopladas a intercambiadores de calor.

1.4 Hipótesis de trabajo

Basándose en parámetros climáticos, geológicos e hidrogeológicos; es posible determinar el potencial de extracción de energía geotérmica de baja entalpía mediante el uso de bombas de calor geotermales acopladas a intercambiadores de calor. El potencial se puede comparar con la demanda térmica de diferentes tipologías de hogares según estándares chilenos. Lo anterior, permitirá tomar decisiones respecto a la configuración de colectores que es conveniente implementar en cada zona de manera eficiente para satisfacer la demanda de una vivienda o un sistema distrital de viviendas.

Es factible generar una reducción efectiva de las emisiones de CO₂ y material particulado por medio de una óptima instalación de Bombas de Calor Geotermales en la ciudad de Osorno como alternativa para satisfacer la demanda térmica.

Por otra parte, si bien la mayor fuente de contaminantes en Osorno corresponde a la combustión de leña, su eliminación podría ser efectiva, a pesar de las implicancias económicas; porque existen políticas que pretenden reducir la contaminación atmosférica para resguardar la salud de la población.

1.5 Uso directo de la geotermia en Chile

En Chile la geotermia ha sido utilizada principalmente con propósitos recreacionales y turísticos. Para estas aplicaciones hay una capacidad instalada de 11,31 [MW] que en energía se traducen en 152,12 [TJ/año]. (Lahsen *et al.*, 2015). El uso de bombas de calor en Chile comenzó en 1996. El 70% corresponde a bombas de calor acoplada a sistemas de intercambiadores cerrados y el resto corresponde a sistemas abiertos.

Según un informe publicado por Aguasol (2016), Chile contaba con una capacidad de 8,6 [MW] en sistemas de bombas de calor en el año 2015, donde un 17% corresponde al sector residencial y el porcentaje restante se distribuye en servicios, industria y edificios públicos. La mayor parte de estos proyectos se concentran en Santiago y, en menor medida, en la Región del Bío Bío.

Dentro de las conclusiones del informe, se destaca que las bombas de calor son una tecnología madura y fiable, mientras que los elementos de conexión y disipación presentan un riesgo asociado al dimensionamiento y ejecución de la tecnología. El uso de bombas de calor tendría potencial de rentabilidad en la industria vitivinícola, piscifactorías, granjas de cerdos, hoteles, hospitales y calefacción distrital. Por otra parte, la industria chilena cuenta con 38 empresas (anexo 2) y un total de 29 proyectos implementados en distintos rubros (figura 10); cubriendo toda la cadena de valor exceptuando la fabricación de bombas de calor. En Chile no existe una legislación específica que afecte a las bombas de calor ni al uso térmico tanto del suelo como del agua subterránea no consuntiva. Tampoco hay mecanismos de promoción para esta tecnología, más allá de las subvenciones genéricas para la implementación de energías no renovables.

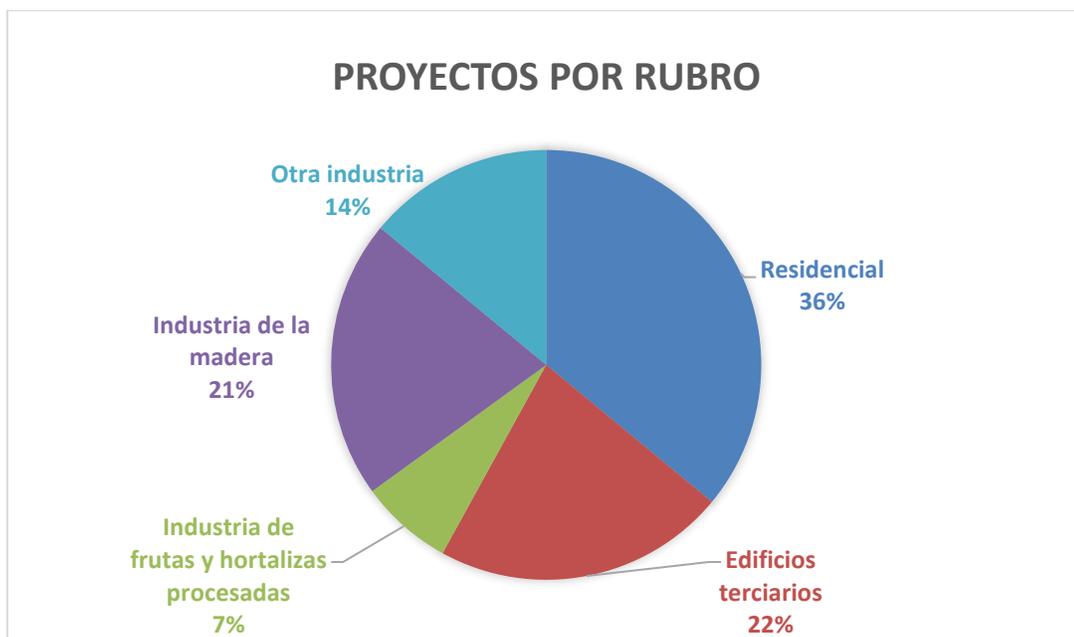


Figura 10: Distribución de proyectos identificados en el marco de proyecto por rubros. Fuente: Aguasol (2016).

Actualmente, el uso directo de la geotermia en Chile no se ha regularizado dentro de un marco legal. La Agenda Energética presentada por el Ministerio de Energía (2014), en el gobierno anterior, propuso enviar un Proyecto de Ley al Congreso para perfeccionar el sistema de concesiones geotérmicas, simplificando la obtención de concesiones de baja entalpía orientadas al autoconsumo de acuerdo con el contexto de una comunidad local y áreas protegidas con los derechos.

Por otra parte, en el presente año, el gobierno presentó su Ruta Energética (Ministerio de Energía, 2018). Esta propone diseñar una estrategia para el desarrollo y penetración de tecnologías térmicas renovables, mediante el levantamiento de información relacionada al potencial disponible, el consumo térmico en diferentes sectores, entre otras estrategias. De este modo, pretende implementar un programa de uso directo de la geotermia, además de otros recursos renovables.

2 ANTECEDENTES GENERALES

La ciudad de Osorno está ubicada dentro de la unidad morfoestructural denominada Depresión Intermedia hacia el sector más septentrional de la Cuenca Osorno - Llanquihue (figura 11), la que tiene una disposición NNE-SSW (Elgueta *et al.*, 2000). La subcuenca de Osorno abarca una superficie de 2500 [km²] aproximadamente, alcanzando su mayor profundidad hacia el sur. Al este y oeste, está limitada por rocas del basamento metamórfico, mientras que en el límite S-SW existe un alto estructural llamado Alto de Río Negro que la separa de la subcuenca de Llanquihue. De acuerdo con Elgueta *et al.* (2000), el relleno terciario de la cuenca alcanza una potencia de hasta 1500 [m]. Por otra parte, el estudio menciona la existencia de una falla normal reactivada a inversa en el extremo oriental de la cuenca y hacia el oeste limita con rocas del basamento metamórfico (figura 11).

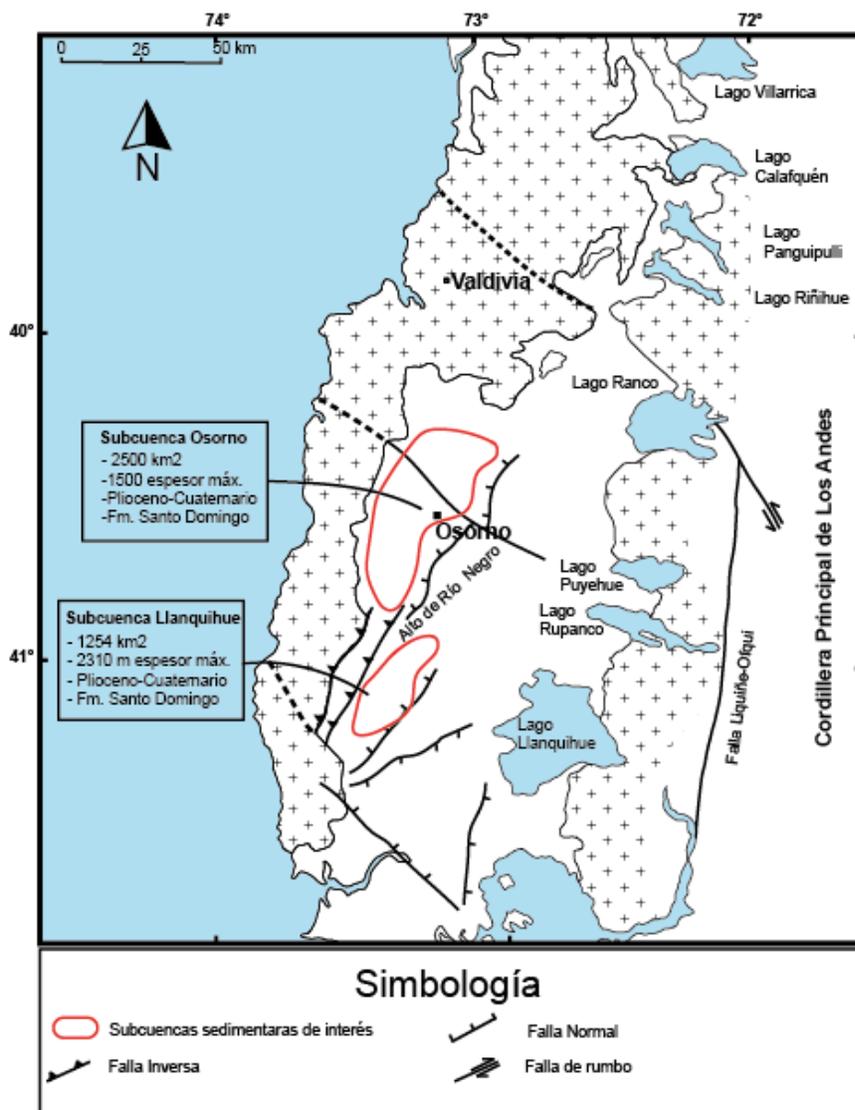


Figura 11: Mapa esquemático de la ubicación de las subcuencas de Osorno y Llanquihue y su relación con el basamento metamórfico. En la figura sólo se presentan las fallas mayores que limitan a las cuencas y altos topográficos como el Alto del Río Negro. Estas fallas no alcanzarían la superficie. Fuente: Modificado de Elgueta *et al.* (2000)

Un informe publicado por Conic BF Ingenieros Civiles consultores LTDA. (2010) detalla un trabajo geofísico que consta de 20 sondeos verticales de Transiente Electromagnético (TEM) a través del relleno sedimentario en la región de Los Lagos (figura 12). El resultado del sondeo del TEM n°5 (tabla 2), ubicado hacia el límite este de Osorno, indica que existen 32 [m] de cubierta cuaternaria de grano grueso sobre un nivel de depósitos cuaternarios de grano fino de espesor indeterminado. Además, según la información recopilada de cada TEM realizado en la zona, no hay presencia de basamento metamórfico hasta los 180 [m] de profundidad.

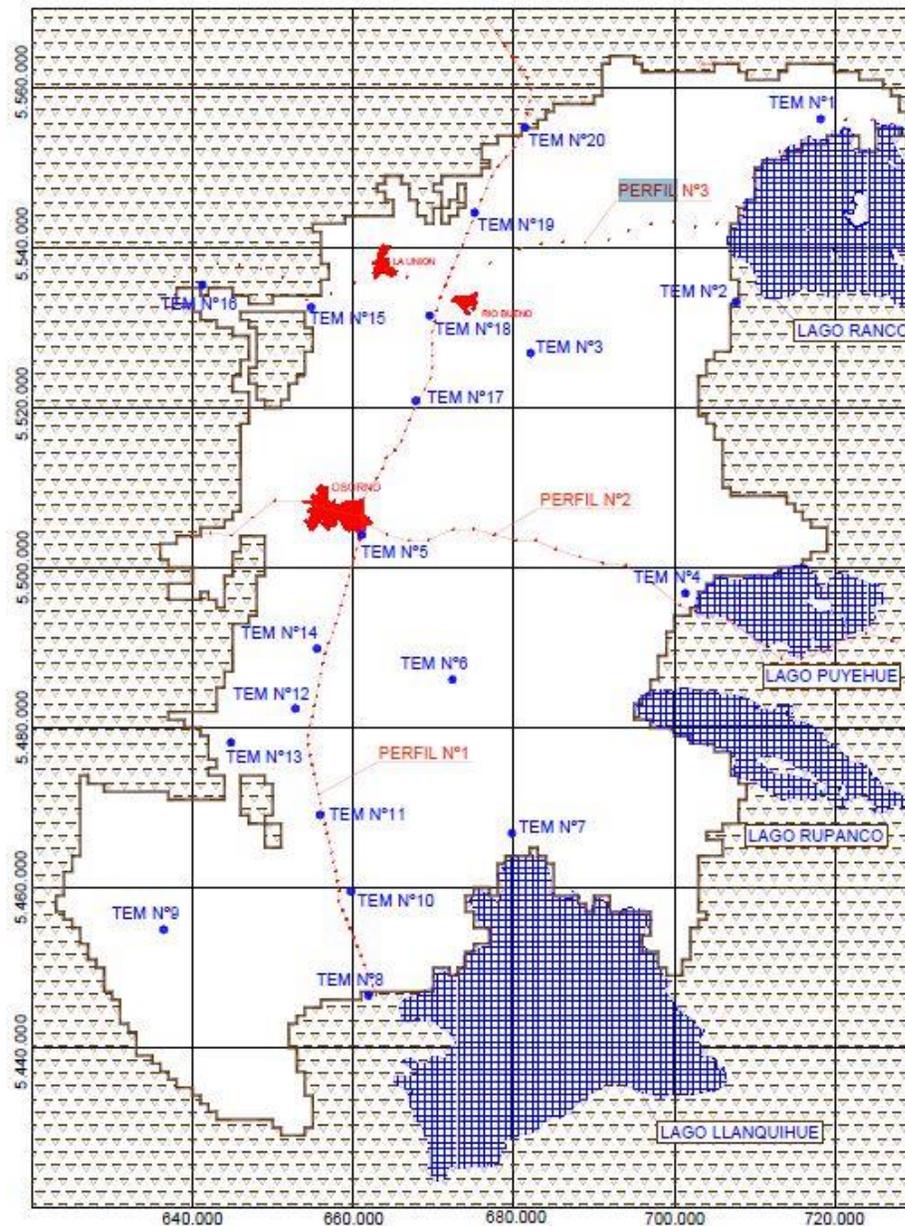


Figura 12: Ubicación de sondeos TEM realizados en el trabajo de Conic BF Ingenieros Civiles consultores LTDA. (2010). Dato TEM n°5 ubicado en el límite sureste de la ciudad de Osorno.

Tabla 2: Estratigrafía geoelectrónica del sondeo TEM n°5. Fuente: Conic BF Ingenieros Civiles consultores LTDA. (2010)

Estrato	Resistividad [Ωm]	Profundidad [m]	Interpretación
1	105	0-32	Cubierta cuaternaria (grano grueso)
2	38	32-¿?	Depósitos cuaternarios (grano fino)

2.1 Gravimetría de la zona de estudio

Un estudio gravimétrico realizado por Morales *et al.* (2015) en las cercanías de Osorno, cuyo objetivo fue determinar tanto la geomorfología del basamento como la potencia del relleno sedimentario de la cuenca, determinó que hay una correlación entre las anomalías gravimétricas y los depósitos de mayor potencia o zonas en que aflora el basamento.

En la figura 13 se muestra un perfil gravimétrico que revela una concordancia entre las anomalías positivas y las rocas metamórficas ligadas a la Cordillera de la Costa hacia el oeste. El perfil gravimétrico muestra que la profundidad del relleno sedimentario se aproxima a los 200 [m], no obstante, puede alcanzar profundidades de hasta 2,5 [km]. En la figura 14 se muestra la ubicación del perfil gravimétrico de interés y en la tabla 3 las densidades utilizadas en el modelo gravimétrico.

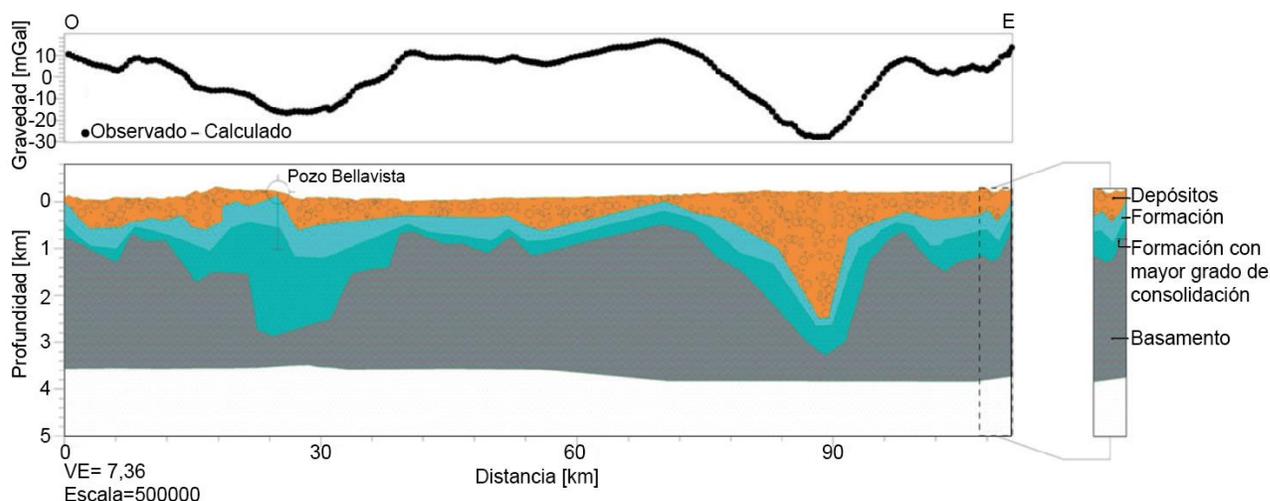
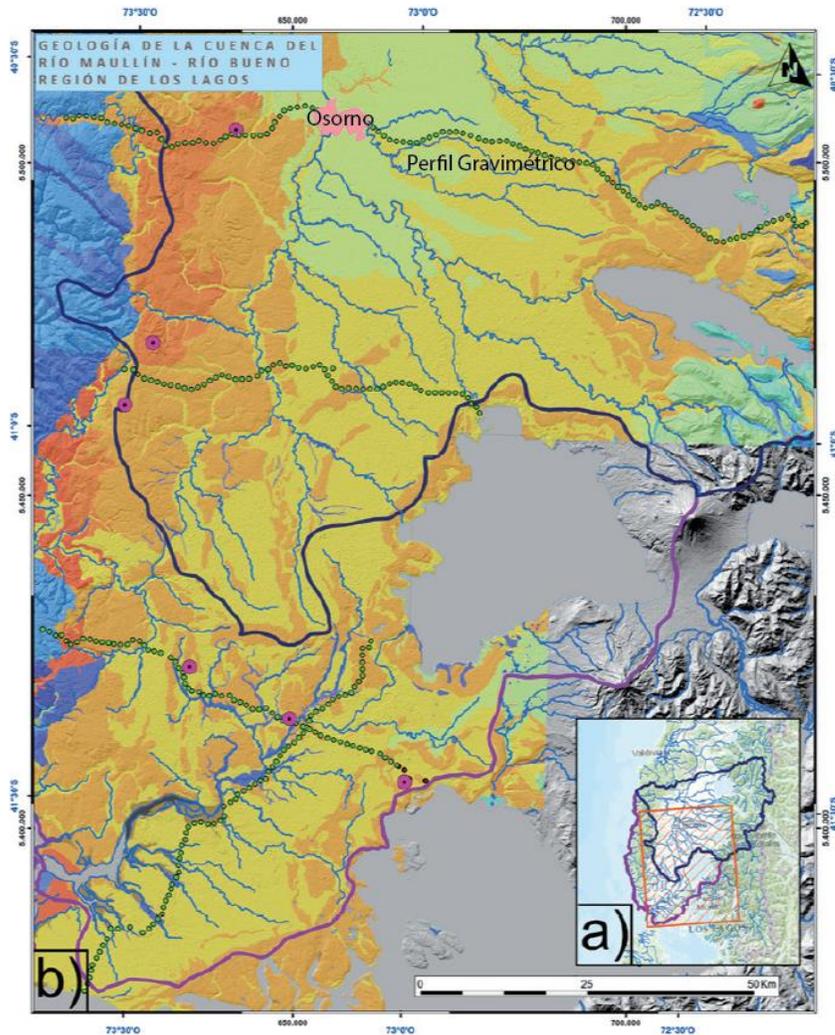


Figura 13: Anomalia residual y modelo de capas para perfil. La figura superior muestra la anomalía residual obtenida del levantamiento de datos (puntos negros) y la anomalía residual calculada en función de la señal emitida por el modelo de capas. Fuente: Morales *et al.* (2015).

Tabla 3: Densidad considerada por el estudio de Morales *et al.* (2015) para cada unidad de la cuenca.

Unidad de la cuenca	Densidad [gr/cc]
Depósitos no consolidados	2,4
Formaciones	2,45
Formaciones bien consolidadas	2,5
Basamento	2,9



SIMBOLOGÍA

Ha	Kg	Pgf1	Plsva	Cuenca Río Bueno
Hc	Mg	PIHl	Pm1	Cuenca Río Maullín
Hd	Mh	PIHm	Pm2	
Hdp	Msd	PIHp	Pm3	
He	Msda	PIHv	Pzbm	
Heo	Msdb	Pldi	Pzbm1	
Hf	Msdc	Pldp	Pzbm2	
Hi	OIMc	Pliv	Pzbm3	
Hp	OIMvs	Pliva	Pzbm4	
Hrm	Pav	Plmdp		
Hv	Pcp	Plmv		
Hva	Pfi	Plsv		

Figura 14: Mapa de ubicación de la geología de la cuenca del Río Maullín y Río bueno. a) Zona de estudio (escala 1:4200000) y límites de cuenca. b) Principales unidades geológicas (escala 1:500000), trazas de perfiles gravimétricos (líneas de puntos verdes), pozos (puntos fucsias) y principales ríos de la zona. Además, se señala la ciudad de Osorno y el perfil gravimétrico de interés. Fuente: Morales *et al.* (2015).

2.2 Geología

Dentro de la zona de estudio, los depósitos no consolidados conforman el relleno de la cuenca sedimentaria como resultado de diferentes fenómenos geológicos. Estos se depositan sobre la Fm. Santo Domingo, la que aflora escasamente en la zona noroeste del área de estudio. En la figura 15, se presentan las unidades que configuran la geología del área de estudio según el trabajo desarrollado por Pérez *et al.* (2014).

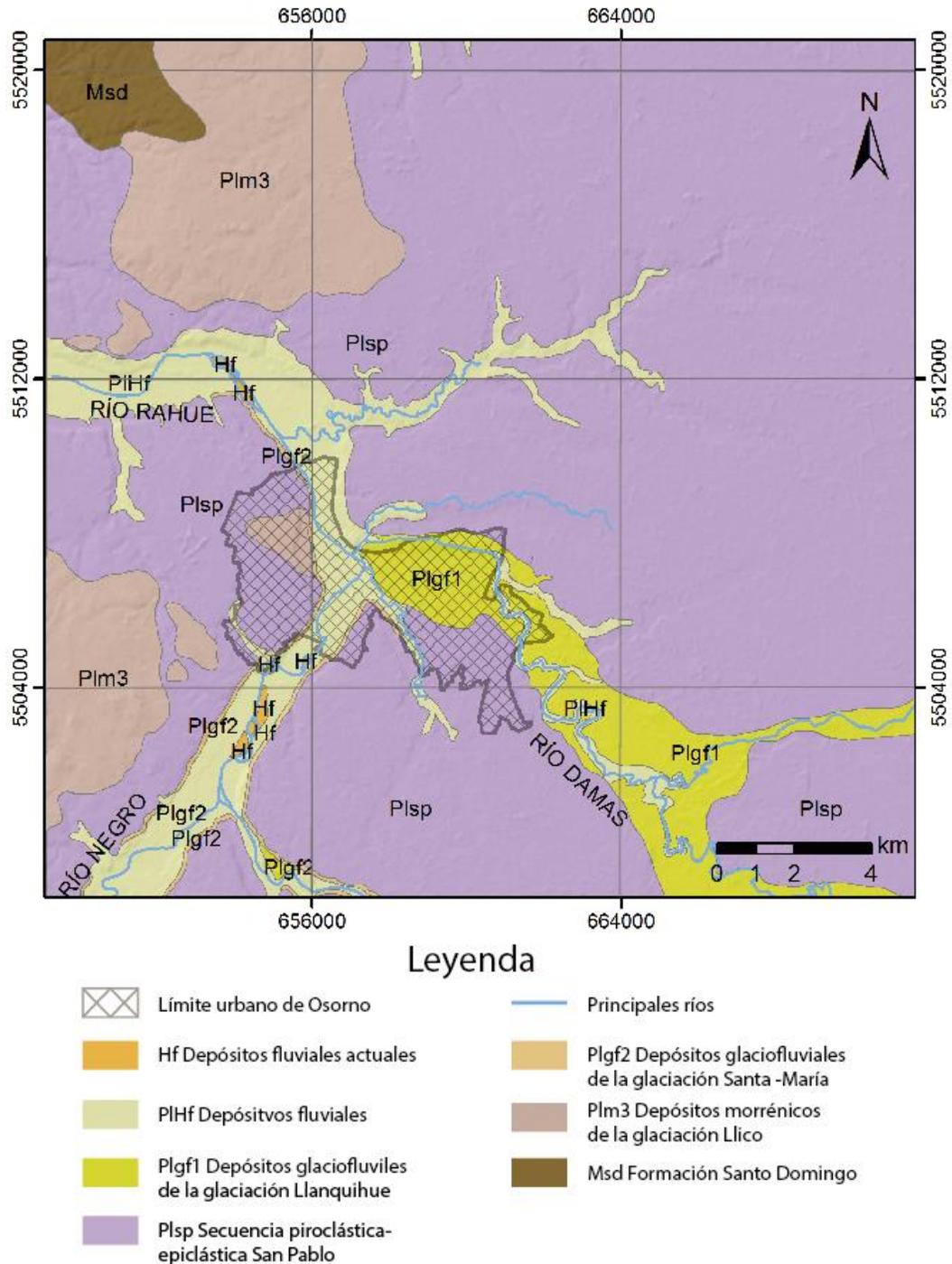


Figura 15: Geología de la zona de estudio (1:150.000). Fuente: Pérez *et al.* (2014). Presenta la ubicación de pozos profundos recopilados de la base de datos de la DGA (Dirección General de Aguas).

2.2.1 Rocas estratificadas

2.2.1.1 Formación Santo Domingo Msd (Martínez y Pino, 1979)

Secuencia sedimentaria marina con asociaciones laterales marginales a continentales compuestas de areniscas, limonitas, arcillolitas y conglomerados en menor medida. Dispuesta como franja de orientación norte-sur, adosada a la Cordillera de la Costa y erosionada por estructuras de canales. En la figura 15 aflora escasamente en el sector noroeste de la zona de estudio.

Sobreyace a la Formación Pupunahue y la Formación Cheuquemó por un contacto gradual; también al basamento metamórfico mediante una discordancia angular y erosión. Es la base de los depósitos no consolidados del Plioceno y Cuaternario. Se le otorga una edad de Mioceno Inferior a Mioceno Medio.

2.2.2 Depósitos no consolidados

Dentro de la geología del área de Osorno hay una secuencia de depósitos morrénicos y glaciofluviales del Pleistoceno interrumpidos por depósitos piroclásticos y epiclásticos. Estos cubren una gran extensión como resultado de procesos glaciares y volcánicos cuaternarios. Sobreyacen discordantemente a la Formación Santo Domingo (Msd).

2.2.2.1 Depósitos morrénicos de la glaciación Río Llico (Plm3) (Porter, 1981)

Se reconocen en el sector occidental del área de Osorno sobre depósitos de la Secuencia piroclástica-epiclástica San Pablo. Corresponden a gravas inmersas en matriz de arcilla y limo, macizos, matriz soportado y de mala selección. En la figura 15, aparecen como una franja orientada de norte a sur y disectada por el Río Rahue.

2.2.2.2 Depósitos Glaciofluviales de la glaciación Santa María (Plgf2) (Porter, 1981)

Gravas y arenas clastosoportadas, de selección moderada a buena y clastos de subredondeados a bien redondeados inmersos en una matriz de arena escasa. Se encuentran estratificados y hacia el suroeste contienen arena con escasos niveles de grava y gravilla que son interpretados como depósitos glaciofluviales distales. Sus características sedimentológicas, grado de alteración y continuidad con las morrenas de la Glaciación Santa María, sugieren que corresponden a este ciclo. En la figura 15 su distribución se asocia a las terrazas formadas por el Río Negro y Rahue.

2.2.2.3 Secuencia piroclástica – epiclástica San Pablo (Plsp) (Pérez *et al.*, 2014)

Comprenden flujos piroclásticos subaéreos y subacuáticos, depósitos lacustres y localmente retrabajo fluvial. Los piroclastos corresponden a ceniza y lapilli, mientras que los epiclastos a bolones, grava, gravilla, arena y arcilla.

La secuencia termina con un nivel de flujo piroclástico moderadamente a bien consolidado con facies subacuáticas y distales fluviales. La unidad Plsp abarca gran parte del área de estudio (figura 15).

2.2.2.4 Depósitos glaciofluviales de la glaciación Llanquihue Plgf1 (Mercer, 1976)

Depósitos de hasta 20 [m] de espesor formados por gravas de selección moderada a buena, clastosoportadas en una escasa matriz arenosa e interestratificadas por lentes de arena. Al oriente afloran como extensas llanuras, mientras que al occidente se relacionan a terrazas de entre 5 y 40 [m] en los cauces de los ríos Damas (figura 15), Rahue, Bueno Pilmaiquén y Llollehue. Los depósitos se relacionan a la Glaciación Llanquihue.

2.2.2.5 Depósitos fluviales PIHf

Depósitos no consolidados de gravas y arenas estratificadas. Poseen selección moderada a buena y están redondeadas, imbricadas e inmersas en una matriz de arena gruesa a media. Generan terrazas de hasta 15 [m] sobre el lecho del río (como en los ríos Pilmaiquén, Rahue y Negro) y están cubiertos por suelos de hasta 50 [cm] de origen piroclástico. Proviene del retrabajo de depósitos glaciofluviales y glaciales de la glaciación Llanquihue, luego del último retiro de los glaciares. En la figura 15 se distribuyen según el cauce de los ríos.

2.2.2.6 Depósitos fluviales actuales Hf

Compuestos de gravas y arenas clastosoportadas, moderadamente seleccionadas e imbricadas, con clastos subredondeados a bien redondeados inmersos en una matriz de arena que podría encontrarse ausente. Localmente puede haber interdigitaciones de arena con limo o grava debido a inundaciones periódicas. Estos depósitos aparecen en los lechos de los ríos activos como en los ríos Rahue, Pilmaiquén, Bueno y Lollel hue; conformando barras y terrazas. Dentro de la figura 15, aparecen localmente en los cauces de los principales ríos.

2.3 Recursos de agua subterránea

El área de Osorno está configurada principalmente por depósitos sedimentarios no consolidados. Según la información gravimétrica y los sondeos TEM, la potencia del relleno alcanza espesores superiores a los 200 [m] (Conic BF Ingenieros Civiles consultores LTDA., 2010). Lo anterior es consistente con las descripciones estratigráficas de los pozos distribuidos en la zona (anexo 7), dado que ninguno supera los 200 [m] de profundidad ni registra basamento rocoso.

En general, los acuíferos² de la zona están limitados superiormente por un estrato impermeable o poco permeable y se alojan a diferentes profundidades, siendo intercalados por estratos impermeables o semipermeables de espesor variable. Según el trabajo realizado por Conic BF Ingenieros Civiles consultores LTDA. (2010), se espera que bajo los 130 [m] de profundidad haya más acuíferos, aunque pueden ser menos atractivos de explotar al tener mayor presencia de sedimentos finos dada la naturaleza de los depósitos.

La zona de estudio está ligada a la cuenca del Río Bueno y aunque presente zonas de baja importancia hidrogeológica hacia el oeste de Osorno, se destaca en general por tener una importancia hidrogeológica buena (figura 16).

² Formación geológica que permite el almacenamiento y desplazamiento o transmisión del agua por poros o grietas, proporcionando cantidades apreciables de agua para su explotación.

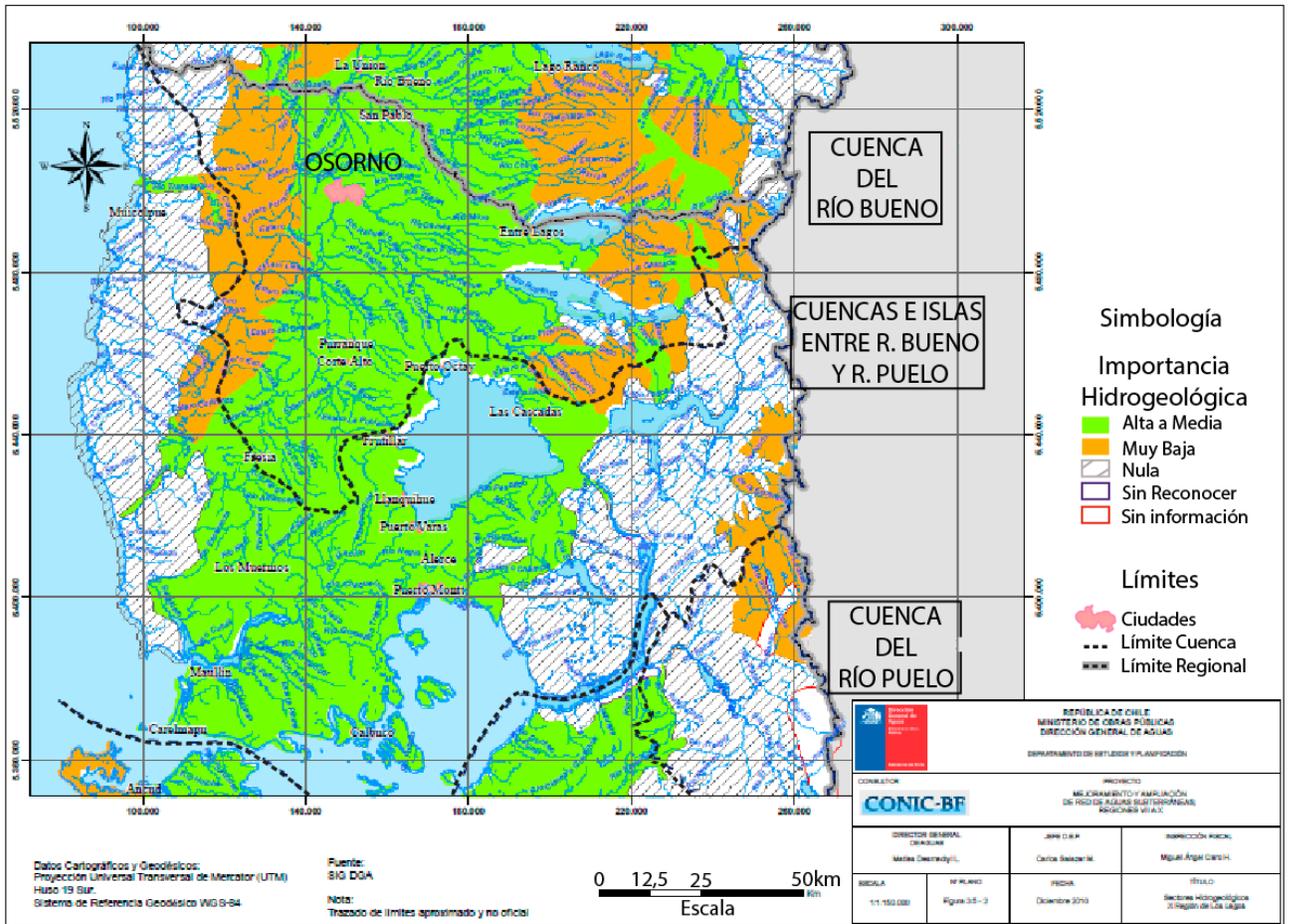


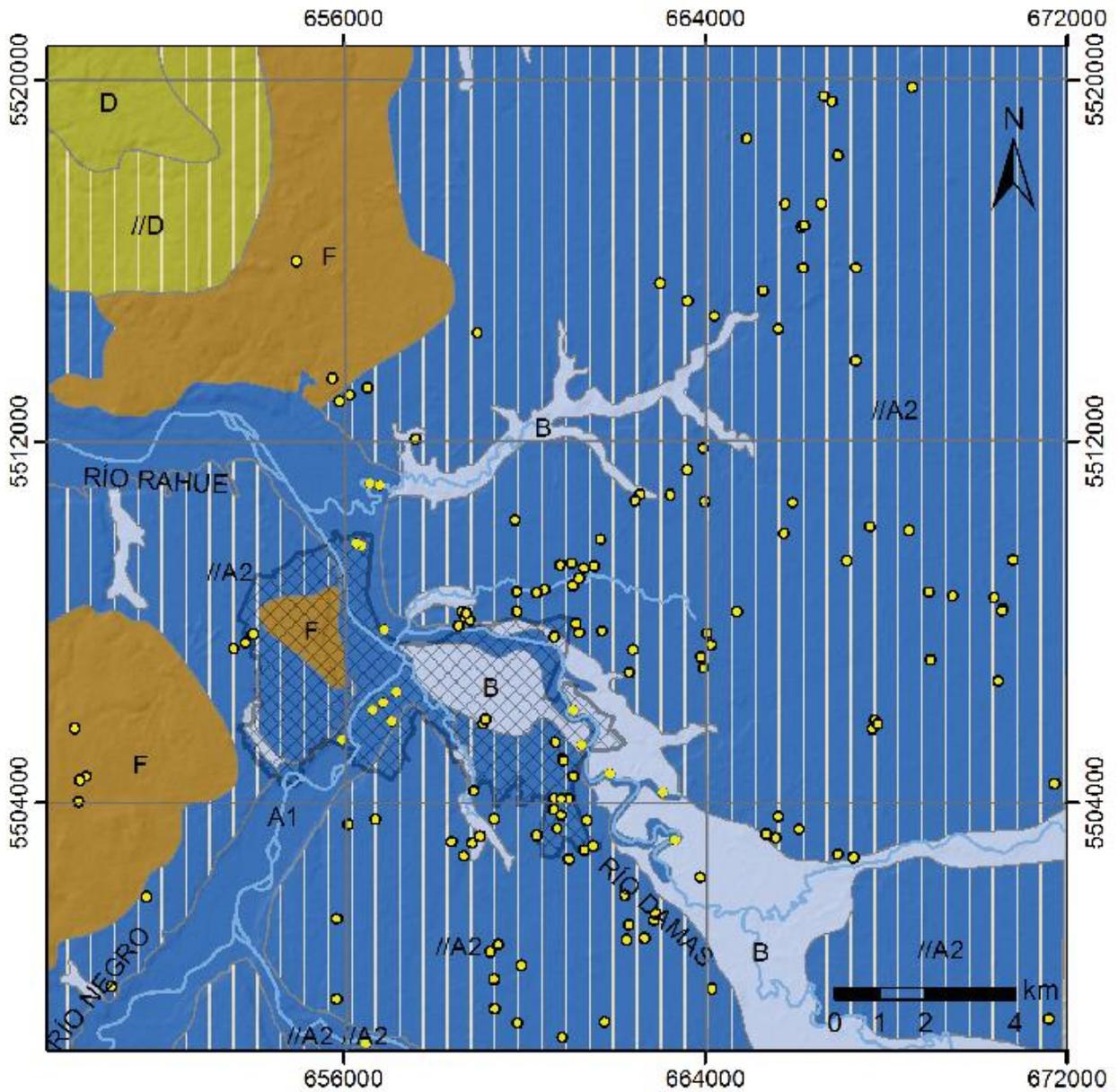
Figura 16: Cuencas y sectores definidos según su importancia económica en la X Región de Los Lagos. Hacia el norte se encuentra la cuenca del río Bueno donde se ubica el área de estudio en la ciudad de Osorno. Fuente: Dirección General de Aguas (2010).

De acuerdo con el estudio desarrollado por Pérez *et al.* (2014), existen diferentes unidades hidrogeológicas determinadas por sus propiedades (figura 17). Aquellas de alta importancia hidrogeológica son el acuífero libre A1 y el acuífero confinado ³//A2, mientras que los acuíferos libres ⁴B y D son considerados de mediana importancia. El acuífero //D está confinado y se considera de baja importancia hidrogeológica. Por otra parte, se ha definido el acuífero ⁵F con nula importancia hidrogeológica. Los acuíferos de interés para la zona de estudio son las unidades A1, //A2 y B. La recarga de acuíferos proviene de los terrenos más altos ubicados al este del área de estudio y también, producto de precipitaciones. La descarga ocurre por medio de las redes fluviales asociadas a valles profundos del río Rahue y más hacia el norte por el río Bueno.

³ Acuífero limitado por un techo impermeable. El agua se encuentra a una presión mayor que la presión atmosférica en todos sus puntos. Si una perforación alcanza su techo, el agua sube por el tubo hasta estabilizarse a un nivel piezométrico. La recarga de estos acuíferos es lateral.

⁴ Acuífero no limitado por un techo impermeable, existiendo un nivel freático a cierta profundidad. Si una perforación lo alcanza, aparece un volumen de agua libre. Su recarga es desde la superficie.

⁵ Formación geológica que almacena agua, pero no la transmite, es decir, no permite el movimiento ni la circulación de agua en su seno. Ello hace posible que no sea posible su explotación.



Leyenda

- | | | |
|---|--|--|
|  Límite urbano de Osorno |  A1 Acuífero libre |  D Acuífero libre |
|  Captaciones DGA |  //A2 Acuífero confinado a semi confinado |  //D Acuífero confinado |
|  Principales ríos |  B Acuífero Libre |  F Acuícludo |

Figura 17: Hidrogeología de la zona Osorno (1:150.000). Fuente: Pérez *et al.* (2014), Presenta la ubicación de pozos profundos encontrados en la base de datos de la DGA.

2.3.1 Definición de acuíferos y sus propiedades (Pérez *et al.*, 2014)

2.3.1.1 Acuífero A1

Acuífero libre conectado a la red fluvial, compuesto por depósitos fluviales (Hf y PIHf) y glaciofluviales de la unidad Plgf1 que yacen sobre los depósitos glaciofluviales de la unidad Plgf2. Su nivel estático se encuentra entre los 10 y 20 [m] de profundidad, la permeabilidad es controlada por la porosidad, variando entre 10^{-3} a 10^{-5} [m/s], y el caudal de pozo varía entre los 10 y 45 [L/s].

2.3.1.2 Acuífero //A2

Acuífero principal de tipo confinado a libre cubierto. En este, los depósitos glaciofluviales Plgf2 están cubiertos por depósitos de baja permeabilidad de la unidad Plsp. En algunas zonas, el acuífero se define como semiconfinado⁶ ya que la cubierta impermeable se encuentra fracturada. La permeabilidad es controlada por la porosidad variando entre los 10^{-3} y 10^{-5} [m/s], el nivel estático se encuentra dentro de los 10 y 43 [m] de profundidad y un caudal de pozo que varía entre los 5 y 47 [L/s]. En el trabajo de Troncoso *et al.* (2008), la unidad se describe como el acuífero que alimenta al 95% de pozos profundos y que tiene una conexión hidráulica con los ríos principales. Se compone por gravas y arenas, intercaladas por arcillas y limos, con forma de estratos y cuerpos lenticulares de extensión variable. Debido al frecuente cambio de facies sus propiedades varían de pozo a pozo.

2.3.1.3 Acuífero B

Acuífero libre compuesto por depósitos glaciofluviales (Plgf1) y fluviales (Hf y PIHf) que yacen sobre depósitos de la unidad Plsp, la que está sobre el acuífero //A2. Se describe un nivel estático somero, pues se encuentra entre 1 y 5 [m] de profundidad; mientras que la permeabilidad depende de la porosidad variando entre 10^{-3} a 10^{-5} [m/s]; finalmente, el caudal de pozo varía entre los 2 y 15 [L/s].

2.3.1.4 Acuífero D

Acuífero libre con conexión a la red fluvial. Se desarrolla en roca fisurada de la unidad estratificada Msd y está localmente cubierto por depósitos fluviales (Hf y PIHf). El nivel estático se encuentra entre los 1,7 y 24,74 [m] de profundidad.

2.3.1.5 Acuífero //D

Acuífero confinado a libre cubierto y compuesto por roca fisurada de la unidad Msd, la que está cubierta por depósitos morrénicos (Plm3) y piroclásticos–epiclásticos (Plsp). Su nivel estático se observa entre los 8,3 y 15,4 [m].

2.3.1.6 Acuífero F

Compuesto por la unidad morrénica Plm3 y la unidad epiclástica-piroclástica Plsp. No constituye un acuífero y posee una muy baja permeabilidad o nula.

⁶ Acuífero de tipo confinado que se diferencia porque se limita en la parte superior por una unidad geológica muy poco permeable, pero capaz de producir la recarga del acuífero.

2.4 Propiedades hidráulicas de interés

2.4.1 Porosidad

Corresponde a la fracción de volumen ocupada por poros. No obstante, en lo que respecta al movimiento del agua, solo intervienen aquellos poros interconectados, lo que se conoce como porosidad eficaz o efectiva.

Los huecos intersticiales se originan por acumulación de material granular durante la génesis de la roca, esto se denomina porosidad o permeabilidad primaria. También, la roca compactada puede haber enfrentado fenómenos geológicos como disolución o fracturación mecánica, generando fisuras que actúan como conductos para la circulación del agua (permeabilidad secundaria).

La porosidad está condicionada por diferentes factores. Una granulometría uniforme permite mayor porosidad eficaz en un depósito. La morfología de las partículas determina que depósitos con material redondeado sean más porosos que aquellos con material anguloso. Por otra parte, a medida que los depósitos se consolidan, el empaquetamiento de las partículas es mayor, reduciendo la porosidad.

La porosidad total es independiente del tamaño absoluto de las partículas, mientras que la porosidad eficaz varía con el tamaño de los granos. La última tiene una relación temporal directa, pues considera el tiempo en que una muestra se demora en drenar. En la figura 18 hay un gráfico que muestra como la porosidad efectiva depende de la granulometría que caracteriza a cada tipo de suelo, la tendencia es que sedimentos más gruesos poseen menor porosidad eficaz, exceptuando arcillas que poseen una alta capacidad de retención. La tabla 4 expone valores de porosidad efectiva según el tipo de suelo (Custodio & Llamas, 1983).

Tabla 4: Valores de porosidad eficaz para distintos tipos de sedimento. Fuente: Custodio & Llamas (1983).

Material	Porosidad eficaz [%]		
	Máxima	Mínima	Media
Arcilla arenosa	12	3	7
Arena fina	28	10	21
Arena media	32	15	26
Arena gruesa	35	20	27
Arena con grava	35	20	25
Gravas finas	35	21	25
Gravas medias	26	13	23
Gravas gruesas	26	12	22

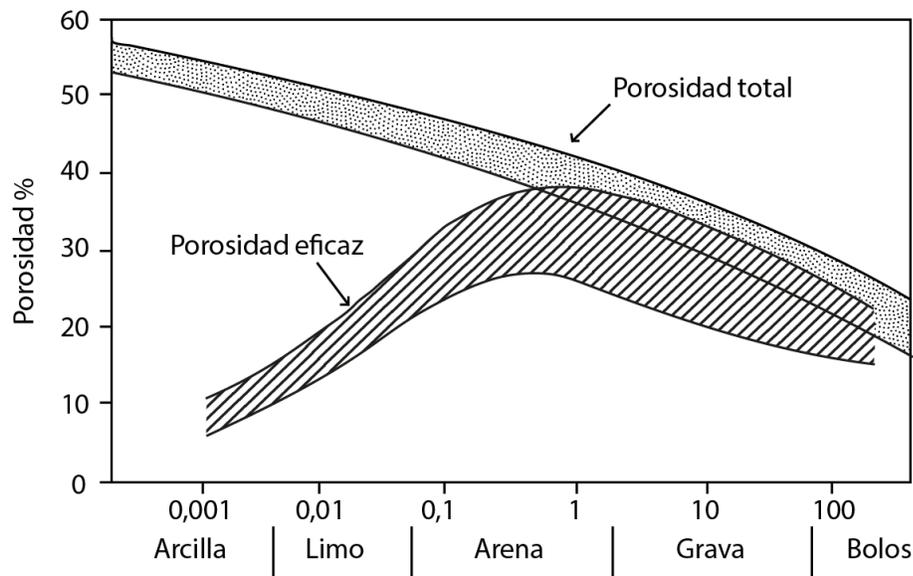


Figura 18: Comportamiento de la porosidad total y efectiva en función de la granulometría del suelo. Fuente: Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (2009) basado en Custodio & Llamas (1983).

2.4.2 Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica (K) determina la capacidad de transmitir agua por un medio condicionado por factores intrínsecos y extrínsecos. Los factores intrínsecos son propios del acuífero y se relacionan al tamaño de los poros; mientras que los factores extrínsecos dependen del fluido, principalmente de su viscosidad como función de la temperatura.

Este parámetro es variable debido a la influencia granulométrica del material, la presencia de intercalaciones finas y las variaciones sedimentológicas del medio. De acuerdo con Sarbu y Sebarchievici (2015) hay rangos de K según el tipo de suelo, su saturación y la influencia que tendría en parámetros termales tales como la conductividad termal (λ) y la capacidad calórica C (tabla 5).

Tabla 5: Influencia de la conductividad hidráulica en parámetros termales de diferentes tipos de suelos. Fuente: Sarbu & Sebarchievici (2015)

Tipo de suelo	K [m/s]	λ [W/(mK)]		C [MJ/(m ³ K)]	
		Suelo seco	Suelo saturado	Suelo seco	Suelo saturado
Arcilla	$10^{-8} - 10^{-10}$	0,2 - 0,3	1,1 - 1,6	0,3 - 0,6	2,1 - 3,2
Limo	$10^{-5} - 10^{-8}$	0,2 - 0,4	1,2 - 2,5	0,6 - 1	2,1 - 2,4
Arena	$10^{-3} - 10^{-4}$	0,3 - 0,4	1,7 - 3,2	1 - 1,3	2,2 - 2,4
Grava	$10^{-1} - 10^{-3}$	0,3 - 0,5	1,8 - 3,3	1,2 - 1,6	2,2 - 2,4

2.4.3 Ley de Darcy

Es la ley básica de hidráulica subterránea. Relaciona proporcionalmente al gradiente hidráulico con la velocidad de Darcy. El experimento de Darcy consiste en hacer viajar un flujo de agua por un gradiente hidráulico (i), que es una pendiente que va desde un nivel de mayor energía hacia uno de menor energía, este flujo de agua se mueve por un

medio poroso de longitud L y sección transversal S . Así, se define una relación para el caudal (Q) que circula por el medio poroso (ecuación 1).

$$Q = K \times \frac{\Delta h}{L} \times S = K \times i \times S \quad (1)$$

De donde se define la velocidad de Darcy (q) (ecuación 2):

$$q = K \times i \quad (2)$$

Esta velocidad de Darcy es imaginaria porque representa al promedio del movimiento real del agua en terreno. Dicho de otra forma, indica la velocidad del caudal por la superficie total del terreno, mientras que la velocidad real involucra la velocidad del flujo sólo a través de los intersticios. Por ende, la relación entre ambas se define en la ecuación 3, donde m_e corresponde a la porosidad efectiva.

$$v_{real} \times m_e = v_{Darcy} \quad (3)$$

2.5 Pruebas de bombeo

Son una herramienta para describir el flujo de agua subterránea mediante pozos hidráulicos (figura 19). Consisten en bombear agua de un pozo (pozo de bombeo). A medida que se extrae agua, se miden las variaciones del nivel del agua en el pozo de bombeo y en un segundo pozo llamado pozo de observación. Una vez que se registran los datos en función del tiempo, se realiza un ensayo de recuperación donde se deja de bombear para registrar el ascenso de los niveles del agua. La prueba más habitual se realiza a caudal constante, es decir que el caudal extraído no varía durante toda la prueba (Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS), 2009).

El descenso del nivel de agua genera un gradiente hidráulico radial llamado cono de bombeo (figura 19), este dependerá de propiedades hidráulicas tales como la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento⁷.

⁷ Parámetro adimensional que representa la cantidad de agua que se ha de inyectar por unidad de superficie de acuífero para aumentar el nivel piezométrico en una unidad. En acuíferos libres se aproxima a la porosidad efectiva.

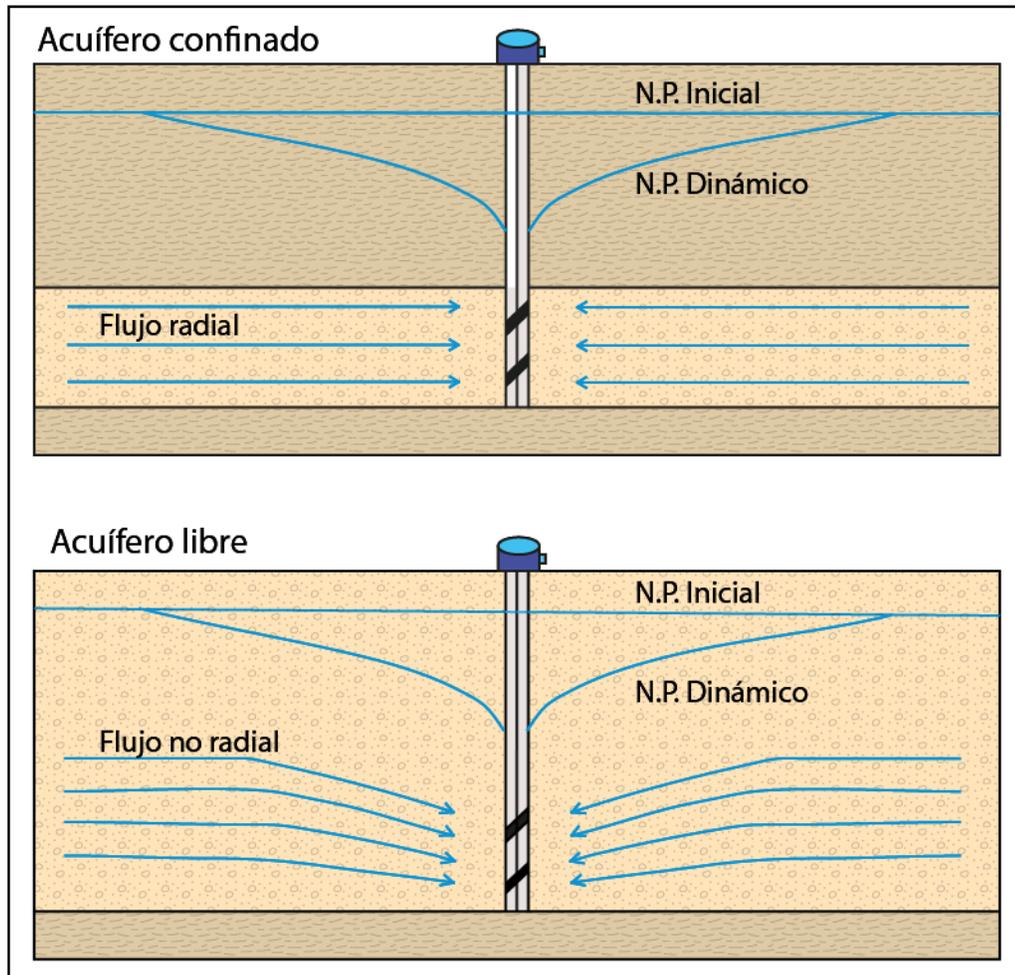


Figura 19: Esquemas de bombeo para acuíferos libres y confinados. El descenso del nivel piezométrico inicial hacia uno dinámico se conoce como el cono de bombeo. Fuente: Gonzalez de Vallejo (2002)

2.5.1 Transmisividad

Es el caudal que circula por un ancho unitario de acuífero bajo la carga de un metro, es decir, la capacidad de un acuífero para transmitir agua considerando las características del fluido, la geometría del acuífero y su textura. Un valor de transmisividad alto representa a un cono de bombeo poco profundo, es decir un abatimiento bajo.

En un acuífero homogéneo es igual al producto de la conductividad hidráulica y el espesor de la zona saturada.

2.5.2 Abatimiento

Como se mencionó, al momento de realizar una prueba de bombeo de gasto constante se produce un descenso vertical del nivel del agua, donde la profundidad del nivel estático (NE) aumenta hasta alcanzar un nivel de estabilización llamado nivel dinámico (ND). La diferencia entre estos niveles se denomina abatimiento.

2.5.3 Ensayos de Bombeo

Existen diferentes métodos para determinar propiedades hidrogeológicas en acuíferos. Uno de estos es el método de Theis, desarrollado para calcular parámetros de importancia en acuíferos confinados. Este método asume que el acuífero es homogéneo e isótropo, mientras que considera un pozo de diámetro pequeño y de penetración total. El método requiere de una prueba de bombeo en que se registre el descenso del agua subterránea en el tiempo a un caudal constante.

Para los acuíferos no confinados se suele utilizar el método de Theis con corrección de Jacob que funciona bajo los mismos supuestos que el método de Theis. Otra alternativa corresponde al método de recuperación de Theis, este considera el ascenso del nivel estático en el tiempo, luego de la prueba de bombeo, y es utilizado principalmente en acuíferos confinados; sin embargo, su solución también se ajusta a acuíferos semiconfinados, libres y de penetración parcial (Kruseman & de Ridder, 1990).

2.6 Temperatura en aguas subterráneas

La temperatura de fluidos en acuíferos no termales se ha utilizado para identificar zonas de recarga, almacenamiento y descarga, entendiéndose que no varía como en acuíferos de tipo termales (Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS), 2009). Es posible detectar un intercambio de fluidos entre acuíferos y corrientes efímeras por variaciones de temperatura entre 5 a 10 [°C]. Estas variaciones también se observan cuando la recarga es relativamente rápida y no se logra estabilizar la temperatura del agua con la temperatura de la unidad que alberga al fluido. También pueden delimitar los flujos en las zonas de mezcla.

La temperatura ejerce un control directo en la conductividad hidráulica, afectando parámetros como: densidad, viscosidad del agua, permeabilidad intrínseca y gravedad. Entonces un aumento de la temperatura del agua mejora la conductividad hidráulica.

La temperatura almacenada se ve fuertemente afectada por las interacciones con la superficie, una envolvente térmica a lo largo del año (figura 20). La amplitud de la temperatura disminuye hasta los 10-15 [m] de profundidad. Desde este punto, la temperatura tiende a la temperatura media anual de la superficie, permaneciendo constante a lo largo del año (Anderson, 2005).

Esta propiedad del agua es importante para determinar el rendimiento de una bomba de calor, por esto es útil analizar la distribución de la temperatura en diferentes zonas. Del mismo modo, se puede estudiar la variación de la temperatura en profundidad.

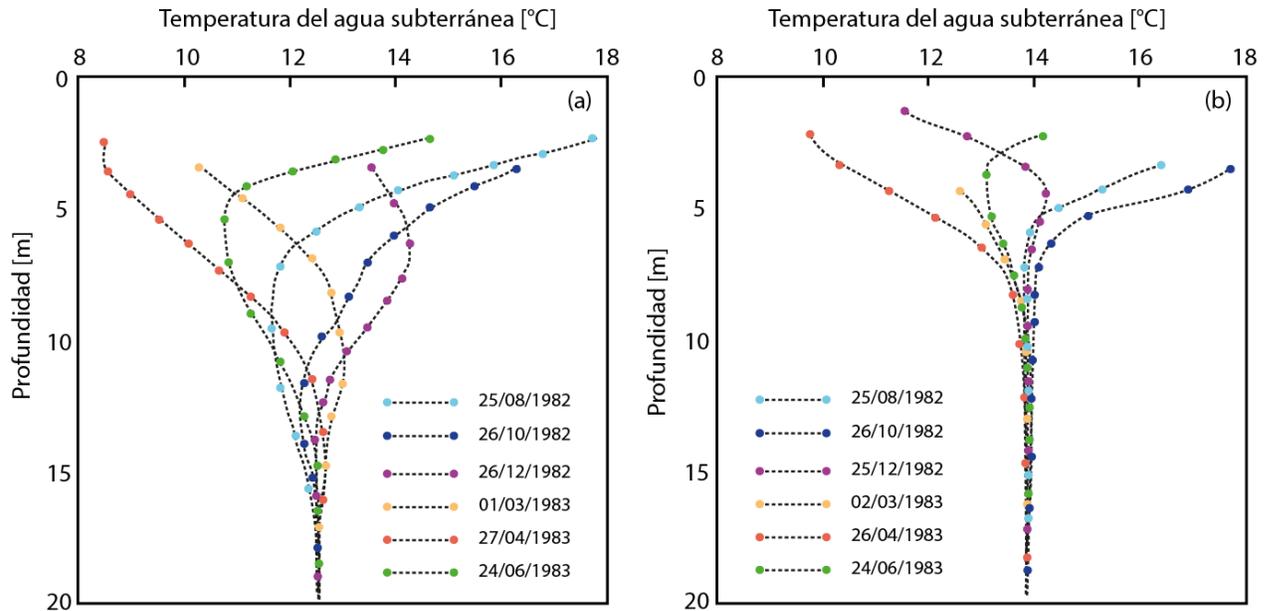


Figura 20: Variaciones estacionales de perfiles de temperatura en aguas subterráneas. A la izquierda, perfiles correspondientes a zonas de recarga y en la derecha a zonas de descarga. Modificado de (Anderson, 2005).

2.7 Comportamiento termal del suelo.

La radiación solar y otros agentes atmosféricos transfieren continuamente energía hacia la superficie terrestre, perturbando la temperatura del suelo más superficial. De acuerdo con Andújar *et al.* (2016), la temperatura del suelo se comporta según la ecuación 4, esta describe la conductividad termal del suelo. Menciona que a mayor profundidad, la temperatura del suelo tiende a la temperatura media ambiente anual, en consecuencia, la amplitud entre la temperatura máxima y mínima anual tiende a cero. Este fenómeno se evidencia en la figura 21, donde también se observa que cuando varía la profundidad se genera un desfase de onda.

$$\rho C \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \nabla \cdot [k \nabla T(x, t)] \quad (4)$$

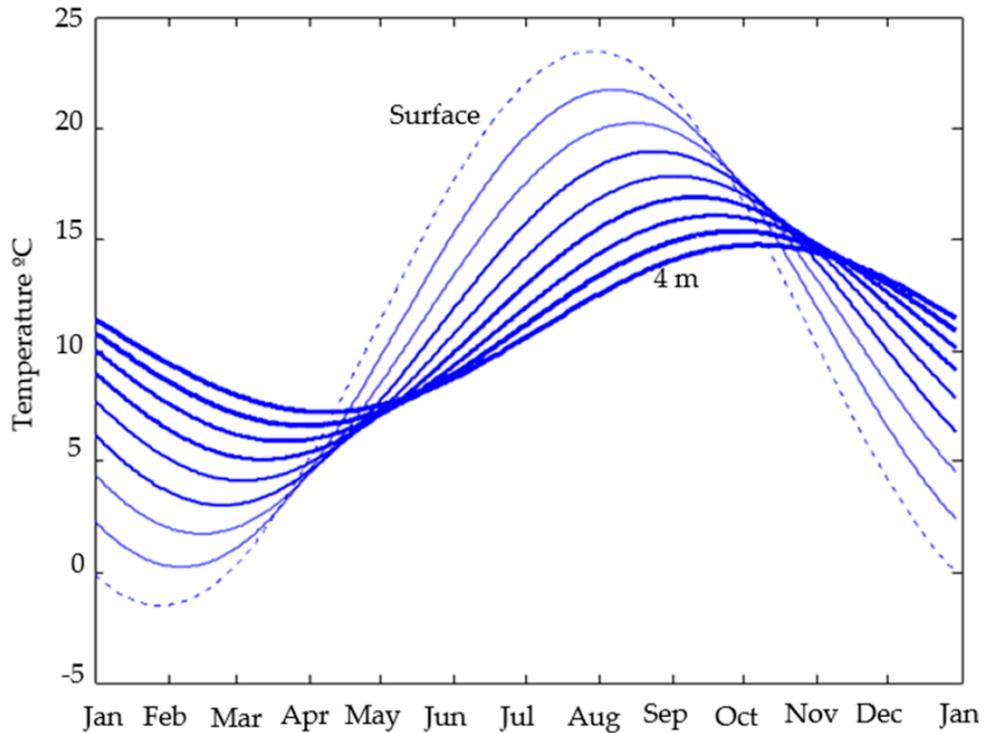


Figura 21: Comportamiento térmico del suelo para profundidades próximas a la superficie (entre 0 y 4 [m]). Fuente: Andújar *et al.* (2016).

2.7.1 Difusividad termal

Es la propiedad del calor para difundirse a través de un medio material, es decir, describe un proceso transiente durante la conducción de calor respecto a la temperatura como condición de borde. De hecho, el proceso de transferencia de calor en el suelo funciona como una combinación de procesos de conducción y de convección intraporos. Passerat de Silans *et al.* (1996) considera a la difusividad termal del suelo como un proceso netamente convectivo. En la tabla 6 se muestran valores referenciales de la difusividad térmica para diferentes tipos de suelo.

Tabla 6: Difusividad termal para diferentes tipos de suelos. Modificado de Andújar *et al.* (2016).

Tipo de suelo	Difusividad térmica [$10^6 \text{ m}^2/\text{s}$]		
	Mínima	Típica	Máxima
Grava seca	0,25	0,25	0,31
Grava saturada	0,75	0,75	0,75
Arena seca	0,19	0,25	0,34
Arena saturada	0,59	0,83	1,72
Arcilla/limo seco	0,25	0,31	0,62
Arcilla/limo saturado	0,26	0,5	0,68

2.8 Plan regulador

El plan regulador comunal (PRC) es un instrumento de planificación urbana desarrollado localmente en cada municipio. Su propósito, según lo expuesto en la Ordenanza Local (Ilustre municipalidad de Osorno, 2007), es generar una normativa referente al límite urbano, zonificación, usos de suelo, condiciones de subdivisión predial, de edificación, de urbanización y vialidad, que regirá dentro del área territorial del plan. En la figura 22 se presenta la zonificación del Plan regulador de Osorno, el uso residencial de cada zona se detalla en el anexo 1.

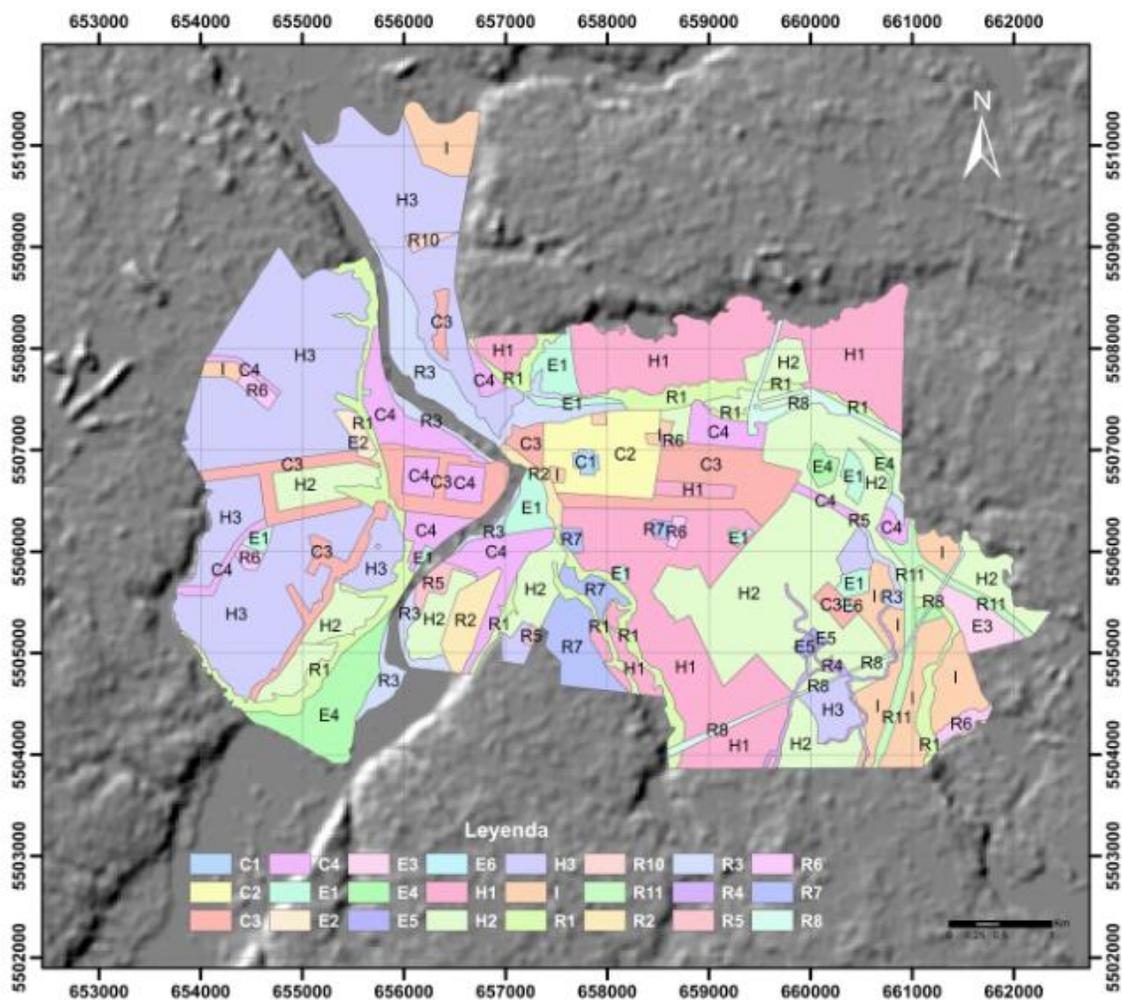


Figura 22: Zonificación del Plan Regulador Comunal modificado de Osorno En la figura se definen las siguientes macro áreas: E: zonas especiales, R: zonas de restricción, H: zonas residenciales y C: zonas comerciales y residenciales ligadas al Centro. Fuente: http://ide.cl/descargas/capas/minvu/PRC-Los_Lagos.rar

2.8.1 Coeficiente de ocupación de suelo

Se define como la relación porcentual entre la superficie edificada y la superficie total del predio, sin incluir las áreas verdes declaradas como de utilidad pública, terrazas y pavimentos exteriores, cobertizos ni construcciones ligeras.

2.8.2 Edificaciones

Se clasifican en aisladas, pareadas o continuas, según la relación que presenta en sus deslindes con las edificaciones vecinas. Las edificaciones aisladas poseen deslindes separados por una distancia mínima establecida; las edificaciones pareadas se encuentran construidas continuamente por un deslinde en común, mientras que las edificaciones continuas comparten ambos deslindes.

2.8.3 Equipamientos

Según el Artículo 2.1.27 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2016), se refiere a construcciones destinadas a la prestación de servicios necesarios para complementar actividades residenciales y productivas. Dentro de estas clases de equipamientos se definen de carácter científico, comercial, culto/cultura, salud, seguridad, servicios, social, deporte, educación y esparcimiento.

2.9 Bombas de calor geotermales

La información que se expone en esta sección está basada en RETScreen International (2005), Florides y Kaligorou (2007) y Sarbu & Sebarchievici (2016).

Como se ha mencionado, la temperatura bajo la superficie permanece relativamente constante a lo largo del año debido a las propiedades termal del suelo: una baja conductividad termal que permite un transporte lento de calor y también una alta capacidad para almacenar calor. Es así como el calor absorbido en verano puede ser utilizado para calefaccionar ambientes en invierno, mientras que el calor absorbido en invierno se puede usar para enfriar ambientes en verano. Otra propiedad importante del suelo es que la temperatura en superficie se relaciona a las fluctuaciones de la temperatura ambiental, pero en profundidad la amplitud de las variaciones de temperaturas se minimiza y tiende a una constante.

Debido a estas características es que las bombas de calor pueden ser utilizadas para extraer la energía almacenada en el suelo de manera eficiente y limpia, con el objetivo de distribuir el calor y acondicionar la temperatura en diferentes espacios tales como casas, edificios, oficinas, entre otros. El uso de bombas de calor puede generar una reducción en el consumo energético, para su modalidad de enfriamiento de ambientes desde 30 a un 40%, mientras que para calefacción de ambientes es de un 20 a 50%.

La bomba de calor posee tres componentes principales: la bomba de calor, un sistema de conexión mediante intercambiadores de calor con la tierra y un sistema de distribución interior para calefacción y enfriamiento.

2.9.1 Bomba de calor

La bomba de calor es responsable de la transferencia de calor entre el sistema de conexión a tierra y el sistema de distribución. El calor es transportado por medio de agua o una mezcla de agua con anticongelante, además se enfrenta a procesos de expansión y compresión para generar variaciones en la presión y temperatura del fluido.

El ciclo de funcionamiento de una bomba de calor en modo calefacción queda representado en la figura 23. Este comienza cuando el calor que proviene del sistema de conexión a tierra llega al evaporador (primer intercambiador); como el refrigerante que circula en la bomba es más frío que el fluido que llega a esta, el calor se transfiere evaporando al refrigerante. El resultado consiste en un vapor de baja presión y temperatura, que es conducido hacia un compresor donde su presión es incrementada junto a su temperatura. Luego, este gas caliente es llevado al siguiente intercambiador, el condensador, donde el vapor es transformado a un líquido de alta temperatura ya que la temperatura del refrigerante supera a la del fluido del sistema de distribución. De este modo, el líquido de alta temperatura es conducido a una válvula de expansión, disminuyendo su presión y temperatura. Finalmente, el refrigerante líquido de baja temperatura vuelve al evaporador reiniciando el ciclo.

Para el funcionamiento de la bomba de calor en modo enfriamiento el ciclo es inverso, es decir, que el fluido proveniente del sistema de conexión a tierra llega al condensador y es transportado al evaporador donde se genera la transferencia con el fluido relacionado al sistema de distribución.

2.9.2 Sistema de distribución de calefacción/enfriamiento

Este sistema cumple la función de llevar el calor desde la bomba de calor hacia la edificación. El calor es transferido mediante circuitos que llevan los fluidos hacia las paredes, el suelo o el cielo y es transmitido mediante radiadores o paneles radiantes.

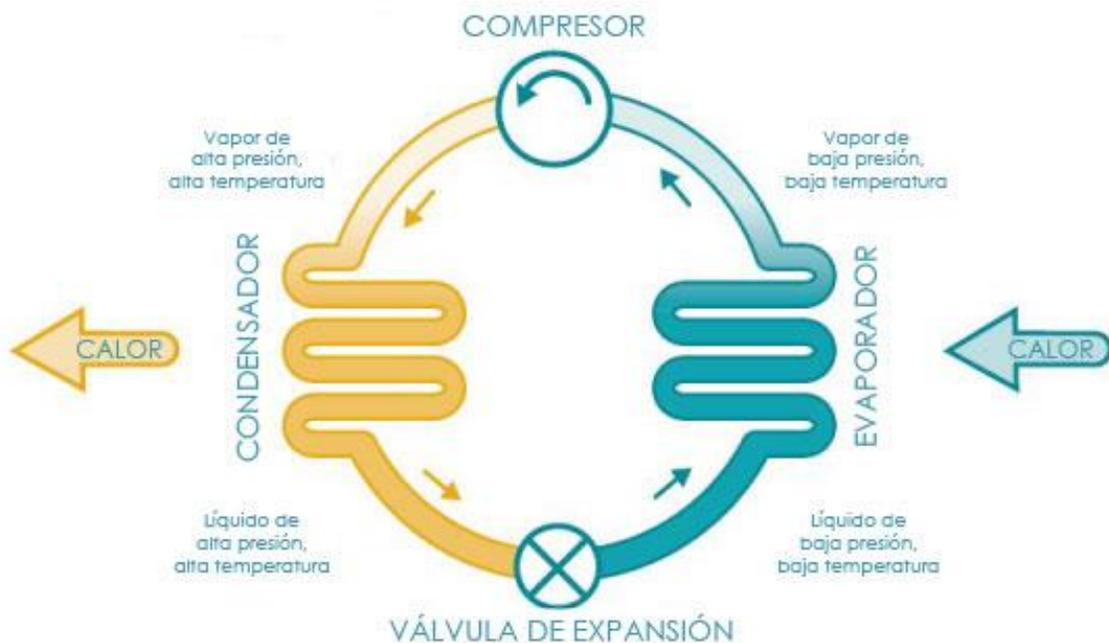


Figura 23: Ciclo de funcionamiento de una bomba de calor. Fuente: Modificado de RETScreen International (2005)

2.9.3 Sistemas de conexión a tierra

Es el sistema encargado de transferir el calor desde el suelo hacia la bomba de calor. Existen diferentes tipos de intercambiadores que pueden estar configurados como circuitos cerrados o abiertos. En los sistemas cerrados, el fluido que circula entre la bomba de calor y la fuente corresponde a una mezcla de un anticongelante con agua u otro fluido y se transporta por una tubería intercambiando calor con algún medio. Los sistemas abiertos usan como fuente de calor tanto aguas subterráneas como superficiales y, además, funcionan como medio de transporte de calor.

La clasificación de los diferentes tipos de configuraciones se ha realizado por la American Society of Heating Refrigerating Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Dentro de los sistemas se encuentran los siguientes: Ground-Coupled Heat Pumps (GCHPs), Groundwater Heat Pumps (GWHPs) Surface Water Heat Pumps (SWHPs) y Ground Frost Heat Pumps (GFHPs). El estudio realizado en este trabajo requiere definir los dos primeros casos.

2.9.3.1 Ground-Coupled Heat Pumps (GCHPs)

Este tipo de intercambiador clasifica como cerrado, es decir que un fluido mezclado con anticongelante viaja por medio de una configuración de tuberías entre la tierra y la bomba de calor, sin que haya un intercambio de fluido entre el exterior y el circuito. Estos intercambiadores se clasifican como verticales u horizontales.

Horizontales

Consiste en una serie de tuberías que yacen horizontalmente dentro de trincheras con profundidades de entre 1 y 2 [m] (figura 24). Las tuberías pueden estar configuradas de diferentes maneras, pueden ser singulares, múltiples o en espiral. Es importante que la superficie del suelo no sea cubierta porque la mayor recarga termal proviene de la radiación solar que impacta en esta.

Son los circuitos más simples y económicos para instalar, sobre todo cuando la instalación es previa a la construcción de una edificación. Sin embargo, son más susceptibles a fluctuaciones de temperatura y se debe disponer de un área suficiente para implementar el sistema y conseguir el potencial energético deseado.

Verticales

Básicamente hay dos tipos de configuraciones verticales, un tubo en forma de U y tuberías coaxiales o concéntricas (figura 25). Los pozos normalmente son perforados entre 45 y 150 [m] y el espacio entre los pozos debe ser rellenado para prevenir la contaminación con aguas subterráneas.

Esta configuración es usualmente instalada donde el suelo cercano a la superficie se encuentra confinado o no hay suficiente superficie para instalar un colector horizontal. Como la temperatura a mayor profundidad tiende a ser constante en el año, su configuración es más eficiente en rendimiento; sin embargo, es más costosa. En la figura 26 se muestra un intercambiador tipo GCHP vertical.

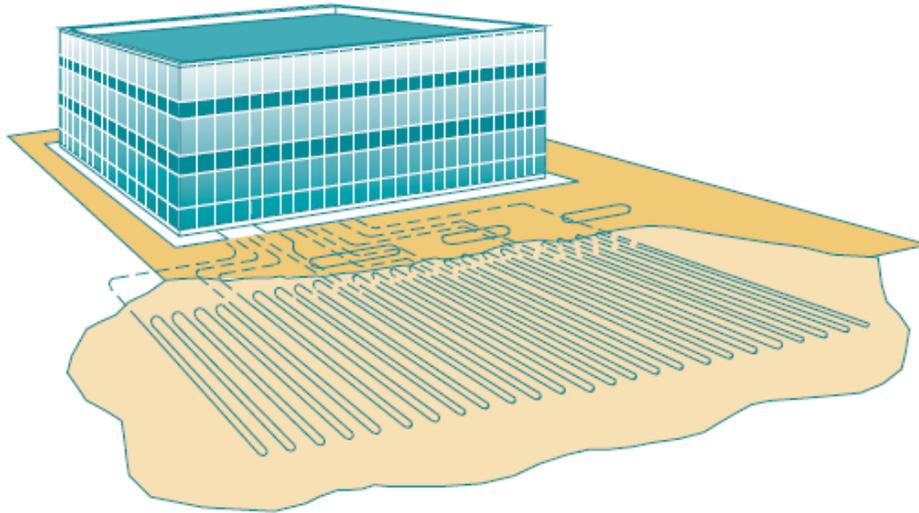


Figura 24: Intercambiadores en sistemas horizontales cerrados (GCHPs). Fuente: Modificado de RETScreen International (2005).

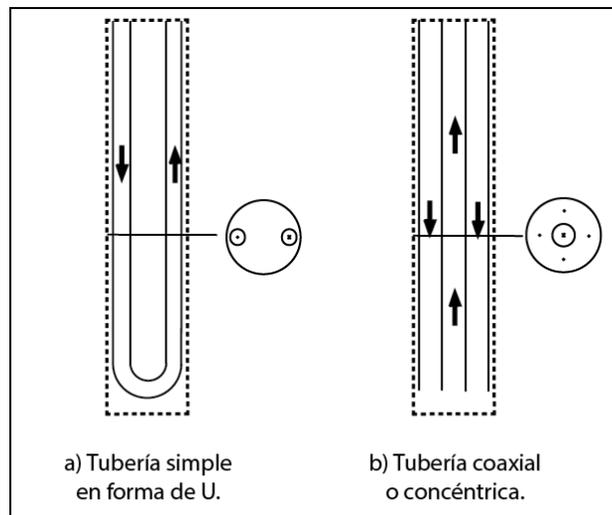


Figura 25: Intercambiadores verticales cerrados según el tipo de tubería. En a, un sistema de tubos simple con forma de U. En b, un sistema coaxial. Fuente: elaboración propia basado en RETScreen International (2005).

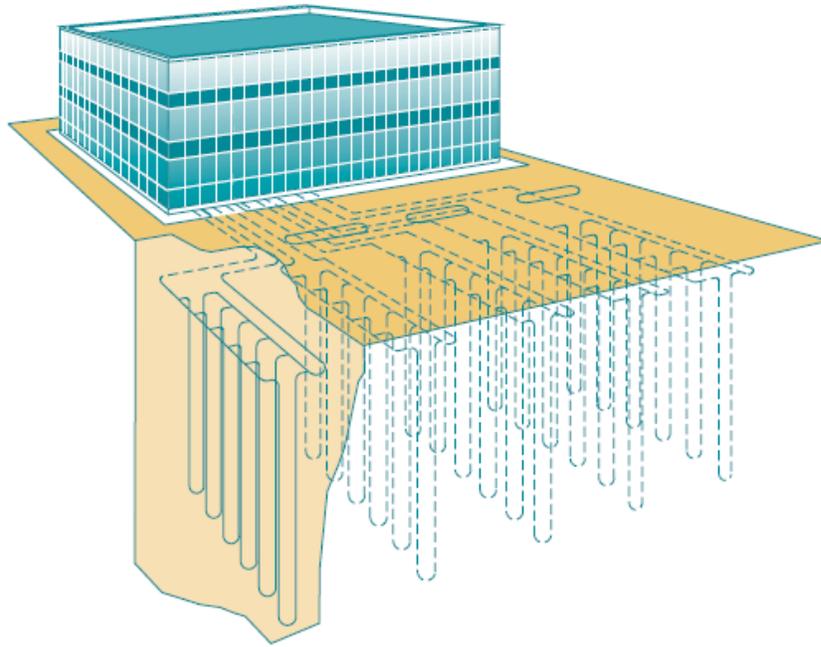


Figura 26: Intercambiadores en sistemas verticales cerrados (GCHPs). Modificado de RETScreen International (2005)

2.9.3.2 Ground water Heat Pumps (GWHPs)

Este tipo de intercambiador es de circulación abierta, ya que se considera al agua subterránea como fuente de calor. Esta es bombeada desde el acuífero hacia la bomba de calor mediante un pozo (figura 27). Este transporte puede ser directo, pero generalmente, previo a la bomba de calor, el fluido debe circular por un intercambiador intermedio, el que transfiere el calor hacia un circuito cerrado y, finalmente, hacia la bomba de calor. Esto para proteger al intercambiador de la bomba de calor de fenómenos como corrosión, abrasión o incrustación.

Luego de cumplir su propósito, el agua debe ser inyectada al mismo acuífero mediante un pozo de reinyección. Este pozo debe estar localizado entre 10-15 [m] en la dirección del flujo del acuífero corriente abajo. La tasa de flujo de agua subterránea deberá ser capaz de repartir energía según la capacidad requerida y dependerá del poder de enfriamiento del evaporador y de la temperatura del agua de enfriamiento.

Una de las principales limitaciones que presenta el sistema es la disponibilidad del recurso hídrico, esto dependerá del estado de las unidades hidrogeológicas y sus propiedades. Otra limitante es el alto valor asociado a la construcción de dos pozos.

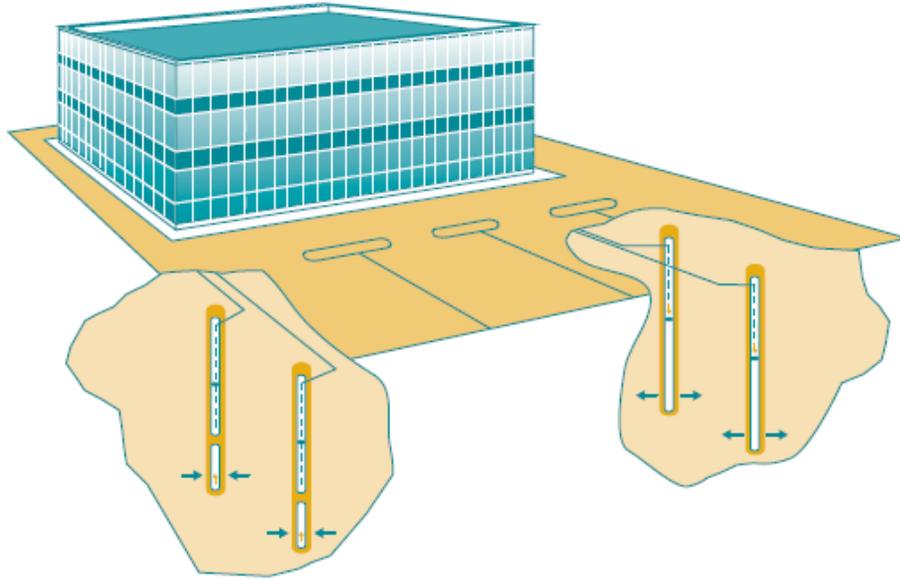


Figura 27: Intercambiadores en sistemas verticales abiertos (GWHPs). Modificado de (RETScreen International, 2005)

2.10 Coeficiente de Rendimiento (COP)

El COP (*Coefficient of Performance*, según sus siglas en inglés) corresponde a una medida de la eficiencia de la bomba de calor. Dependerá tanto de la calidad de los componentes como del gradiente de temperatura entre el fluido que ingresa al sistema y la temperatura deseada para una edificación. Entonces, el COP se puede entender como la tasa de la energía calórica producida por la bomba de calor y la energía eléctrica consumida por la bomba de calor.

Mustafa (2008) menciona que una bomba de calor típica posee un COP de 4, mientras que un calefactor eléctrico tiene un COP de 1. Esta relación indica que la eficiencia de un calefactor eléctrico es de un 100%, ya que generaría 1 [W] térmico por cada 1 [W] eléctrico, mientras que en la bomba de calor tiene una eficiencia de un 400%, pues genera 4 [W] térmicos por cada 1 [W] eléctrico.

En el trabajo realizado por Antonijević *et al.* (2012) se menciona que COP es la tasa de potencia termal suministrada al sistema de calefacción (Q_h) y la potencia generada por la bomba de calor (W) (ecuación 5).

$$COP = \frac{\dot{Q}_h}{W} = \frac{Q_f + W}{W} \quad (5)$$

En la ecuación 5, hay que notar que Q_f corresponde a la potencia obtenida de la fuente. Para Mustafa (2008), el COP se restringe por la segunda ley de la termodinámica para un ciclo de Carnot, denominada para este caso como eficiencia de Carnot (ecuaciones 6 y 7, eficiencia de Carnot para calefacción y enfriamiento de ambientes, respectivamente).

$$COP_{calefacción} = \frac{\Delta Q_c}{\Delta A} \leq \frac{T_c}{T_c - T_f} \quad (6)$$

$$COP_{enfriamiento} = \frac{\Delta Q_f}{\Delta A} \leq \frac{T_f}{T_c - T_f} \quad (7)$$

En las ecuaciones 6 y 7, la temperatura se encuentra medida en [K]. Además, T_c y T_f corresponden a la temperatura absoluta del foco caliente y frío, respectivamente. Adicionalmente, se puede generar un ajuste mediante un factor de rendimiento α , llamado factor de eficiencia, obteniendo como resultado la ecuación 8. El factor de rendimiento que se recomienda usar es de 0,5 según lo expuesto en el trabajo de De Swardt & Meyer (2001).

$$COP = \alpha \frac{T_c + 273}{T_c - T_f} \quad (8)$$

La ecuación 5, puede ser reescrita para calcular la potencia total (Q_t) que genera una bomba de calor (ecuación 9). En esta relación se tiene que (Q_f) corresponde a la potencia que se puede obtener del suelo o agua subterránea, es decir, la fuente.

$$Q_T = Q_f \left(\frac{COP}{COP - 1} \right) \quad (9)$$

2.11 Limitantes

2.11.1 Limitantes económicas

Una de las principales consideraciones para decidir sobre el sistema de bomba de calor implementado en cada zona, es la inversión que se debe generar para su instalación. Por ende, se han recopilado antecedentes referentes al costo de instalación aproximado en cada sistema, teniendo en cuenta las variables más relevantes.

Se cotizaron diferentes bombas de calor (tabla 7), considerando el costo de una bomba de calor y su montaje. En la tabla 8 se detalla el costo asociado a la implementación de sistemas horizontales cerrados, su detalle en el anexo 9. Corresponde al sistema más económico debido a que no requiere generar pozos; sin embargo, hay que agregar el costo de excavar el suelo para instalar los intercambiadores.

Tabla 7: Cotizaciones de diferentes modelos de bombas de calor en el mercado.

Modelo Bomba de Calor	Valor (MM\$) +IVA	Montaje (MM\$) +IVA	Total (MM\$)
Bomba de calor ecoGeo b1 5-22kW	7,31	4,25	11,56
Bomba de calor MTEC S18EuC 230V W55	8,06	5	13,06
Bomba de Calor GEO060Z	4,86	0,54	5,4
Bomba de calor MTEC S20EuC 230V W55	8,3	5,5	13,8
Promedio	7,13	3,82	10,95

Tabla 8: Cotizaciones de costos en millones de pesos chilenos para bombas de calor acopladas a sistemas horizontales cerrados sumado a costo de instalación.

Modelo Bomba de Calor	Total (MM\$) +IVA
Bomba de calor ecoGeo b1 5-22kW	19,87
Bomba de calor MTEC S18EuC 230V W55	21,35
Bomba de Calor GEO060Z	12,52
Bomba de calor MTEC S20EuC 230V W55	23,18
Promedio	19,23

La inversión en sistemas verticales considera el valor de la bomba de calor y la perforación de pozos. El costo de perforación (tabla 9) dependerá de la profundidad necesaria para suplir la demanda energética (Dirección General de Aguas, 2013).

Tabla 9: Costos de perforación de pozos para la aplicación de bombas de calor acopladas a sistemas verticales. Fuente: Dirección General de Aguas (2013).

Detalle	Costos
Perforación D _{mín} =16"	280.000 [CLP/m]
Entubación cañería de acero D=12", e 6,3mm	80.000 [CLP/m]
Cribas de acero al Carbono, Slot 40, D=12"	220.000 [CLP/m]
Suministro y colocación de filtro granular	46.700 [CLP/m]
Sello brocal y de hormigón	225.000 [gl/m]
Tapa de pozo según plano	50.000 [gl/m]

2.11.2 Limitantes legales

En Chile, la Ley N°19657 dictada el año 2000, se encarga de regular las concesiones y licitaciones para la exploración y explotación de la energía geotérmica. Esta se entiende como la energía obtenida a partir del calor natural de la tierra y se puede extraer en forma de vapor, agua, gases o fluidos inyectados artificialmente.

Los derechos de exploración son todas aquellas actividades realizadas con el objetivo de conocer el potencial energético, mientras que el derecho de explotación consiste en todas las actividades que permiten transformar la energía geotérmica en energía eléctrica o calórica, confiriendo el derecho de aprovechar la energía dentro de los límites espaciales de la concesión.

Una concesión es el derecho de propiedad en el dominio del predio. Las concesiones pueden ser solicitadas por cualquier persona jurídica o natural y deben solicitarse junto a una serie de antecedentes detallados en la Ley. La institución a cargo del cumplimiento de la Ley es el Ministerio de Energía.

En una concesión de energía geotérmica, se pueden constituir concesiones mineras, derechos de aprovechamiento de aguas o permisos de exploración de aguas subterráneas. Los derechos de agua están regulados en el Código de Aguas. Dentro de

los deberes asociados a la explotación del recurso, una vez conseguida la concesión, es necesario declarar anualmente la explotación comercial o industrial realizada. La ley no precisa en la forma de extracción y no detalla regulaciones respecto del uso residencial.

Para la implementación de sistemas verticales abiertos se requiere acceso al agua subterránea, solicitando un derecho de aprovechamiento no consuntivo de agua subterránea. Según el Artículo N°14 del Código de Aguas, un derecho de aprovechamiento no consuntivo es aquel que permite emplear agua sin consumirla y obliga a restituirla en la forma en que lo determine el acto de adquisición o de constitución del derecho. La extracción o restitución será permitida siempre y cuando no perjudique los derechos de terceros constituidos sobre las mismas aguas, en cuanto a su cantidad, calidad, substancia, oportunidad de uso y demás particularidades.

En la página web www.DGA.cl existe una guía (Dirección General de Aguas, 2015) que sirve como orientación al público para solicitar derechos de aprovechamiento de aguas. Se tiene que realizar una solicitud dirigida al Director General de Aguas, ingresándola según la procedencia en la Oficina de Partes de la Dirección General de Aguas de la provincia en que se ubique el punto de captación de aguas que se desea constituir. Si no existe la oficina en el lugar, deberá presentarse ante el Gobernador Provincial respectivo. Dentro de los requisitos de la solicitud, se debe: individualizar al solicitante, indicar la naturaleza subterránea del agua, indicar región, provincia y área de protección de la captación solicitada, caudal máximo requerido, puntos de captación en coordenadas UTM Datum WGS84, la forma de extracción, el carácter del derecho (no consuntivo, permanente, discontinuo o continuo o alternado con otras personas) e indicarse el punto de restitución de las aguas.

Por otra parte, conforme a una actualización realizada en febrero de 2017, se establecen restricciones a los Derechos de aguas en la zona de Osorno. La zona ha sido declarada Reserva de Caudales como se puede ver en la figura 28, sin embargo, no existen zonas de restricción o prohibición.

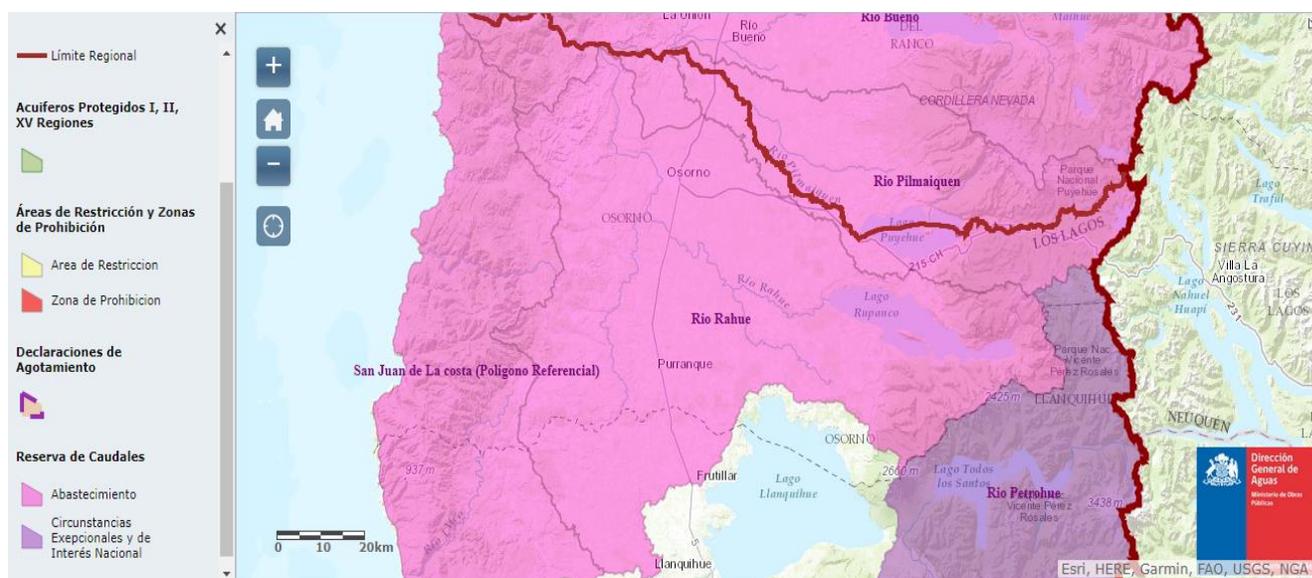


Figura 28: Restricciones a los derechos de agua en la zona norte de la X Región. Fuente: www.dga.cl

Según se expone en Aquaterra Ingenieros LTDA (2014), el concepto de Reserva de Caudales se comienza a aplicar desde 2005, donde entra en vigor la Ley N°20017 que modifica el Código de Aguas. Se lleva a cabo mediante la denegación de una parte de determinadas solicitudes de una fuente, para asegurar la disponibilidad de recursos destinados a la constitución de solicitudes según los usos señalados en el Código. Así la reserva de caudales está asociada a una solicitud de derechos y a la fuente en que fueron solicitados. Se puede realizar una reserva en los siguientes casos:

1. Si en la fuente hay solicitudes de derechos en trámite
2. Si en el área asociada a la fuente hay una demanda potencial acorde a lo señalado en el Código de aguas.
3. Si en la fuente existe una disponibilidad para el otorgamiento de derechos consuntivos.

Finalmente, otra limitante, más bien social, es la opinión de la comunidad sobre la implementación de este tipo de energía renovable. De acuerdo con el Plan de Desarrollo Comunal (CLIODINAMICA, asesorías, consultoría e ingeniería LTDA., 2013), el Censo 2002 registra que al menos un 5,8 % de la población de Osorno posee viviendas abastecidas de agua mediante pozos o norias. En la figura 29 se genera un desglose del porcentaje de viviendas abastecida de aguas subterráneas en diferentes sectores de Osorno.

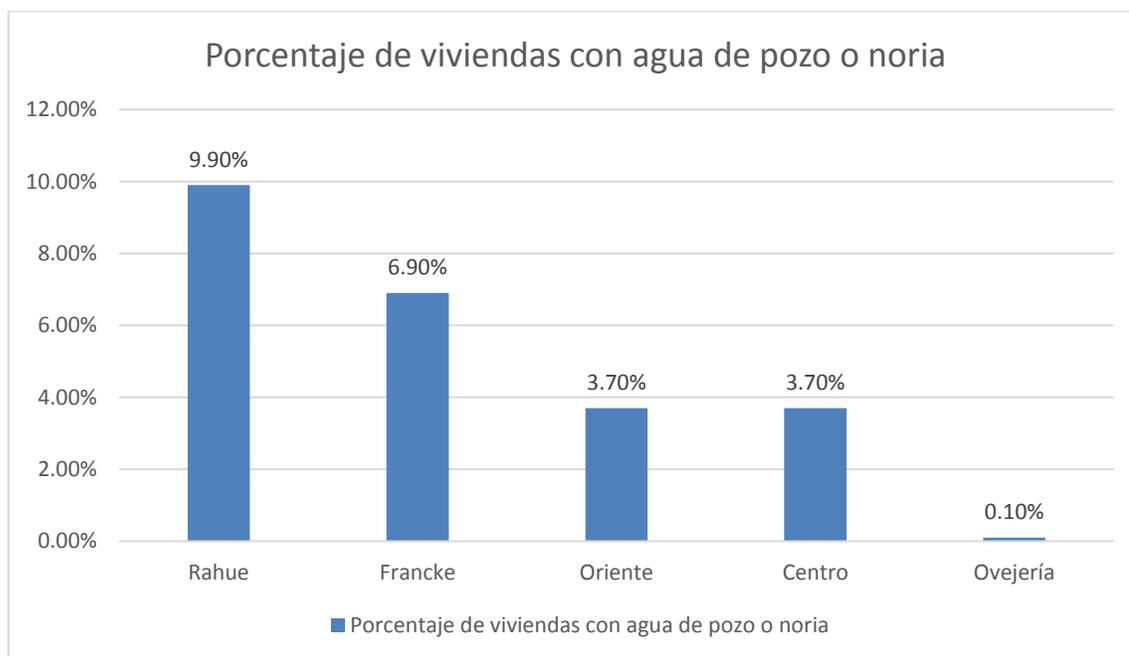


Figura 29: Porcentaje de viviendas con agua a través de pozos profundos o norias para cada sector de Osorno. Basado en el Censo 2002.

3 METODOLOGÍA

3.1 Terreno

3.1.1 Trabajo previo

Previo a la fecha de terreno, se realizó trabajo de gabinete, donde se selecciona un conjunto de pozos distribuidos homogéneamente en el área de estudio. Para esto, se realiza una búsqueda de aquellos propietarios de derechos de aguas en pozos profundos mediante una búsqueda en la base de datos de la DGA. Se gestionaron los permisos para acceder a las dependencias en que se ubica cada pozo y en base a la cantidad de respuestas positivas, se planificó el itinerario del terreno. Se escogió preferencialmente empresas privadas, dentro de las cuales se encuentran: Watt's S.A., Feria de Osorno S.A., Prolesur S.A., Inmobiliaria Kaufmann, ESSAL S.A., MADEXPO LTDA., Frohlich y CIA LTDA., Agrosuper comercializadora de alimentos LTDA, Club de Campo Osorno.

3.1.2 Trabajo en terreno

El trabajo en terreno se desarrolló en el área urbana de la ciudad de Osorno entre el martes 6 de junio y el jueves 9 del mismo mes. Durante este periodo, se midieron perfiles de temperatura, niveles estáticos y conductividad eléctrica del agua subterránea en los pozos seleccionados. Adicionalmente, se midieron cuatro parámetros térmicos del suelo en sitios seleccionados, estos son: conductividad térmica, resistividad térmica, difusividad térmica y calor específico

En terreno se visitaron 19 pozos profundos (~100 [m] de profundidad), tomando 8 perfiles de temperatura y niveles estáticos, además de 3 mediciones de temperatura mediante la activación de la bomba en superficie. El registro de temperatura, nivel estático y conductividad eléctrica en pozos fue realizado con la sonda Solinst 107 TLC. Las mediciones se hicieron introduciendo la sonda al interior de los pozos para medir cada 2 [m] dentro de la zona saturada en agua.

Para los parámetros termales se realizaron 24 mediciones con un conductímetro (KD2 Pro Thermal Properties Analyzer Decagon Devices INC). Este equipo cuenta con dos sondas: la sonda SH1 que mide los 4 parámetros antes mencionados y la sonda TR1 que mide sólo la conductividad y la resistividad termal; las mediciones tomadas, se distribuyen en 6 puntos geográficos dentro de la zona de estudio.

Ambos instrumentos fueron facilitados por el CEGA.

3.2 Propiedades hidrogeológicas

Para estimar los parámetros hidrogeológicos que permiten entender el comportamiento de los acuíferos en la zona de estudio, se genera una base de datos que cuenta con información obtenida de expedientes de derechos de aguas publicados por la DGA (www.dga.cl/productosyservicios/derechos_historicos/Paginas/default.aspx) .

Estos expedientes contienen pruebas de bombeo realizadas en captaciones de pozos profundos de aguas subterráneas ubicados en la zona de Osorno y alrededores, así como, perfiles estratigráficos y toda la información requerida para solicitar un derecho de agua.

A partir de la información recopilada tanto en terreno como en la base de datos de la DGA, se realizan interpolaciones por medio del método de *kriging* ordinario (circular, con anisotropía). Una interpolación espacial es una estimación local del valor de una variable regionalizada dentro de un sector del campo estudiado, mediante un conjunto discreto de datos disponibles para tal variable.

3.2.1 Niveles estáticos y cotas hidráulicas

En el caso de los niveles estáticos (NE) la interpolación es directa, mientras que las cotas hidráulicas se calculan mediante la ecuación 10. La información topográfica de altitud se consigue de un modelo de elevación digital (DEM según sus siglas en inglés), obtenido en el sitio web <http://vertex.daac.asf.alaska.edu/>

$$Cota\ hidráulica\ [m.\ s.\ n.\ m] = Altitud\ geográfica\ [m.\ s.\ n.\ m] - NE\ [m] \quad (10)$$

3.2.2 Distribución de sedimentos

La distribución de sedimentos en superficie se obtiene directamente de la Geología para el Ordenamiento Territorial: área de Osorno (Pérez *et al.*, 2014); así mismo, los sedimentos en profundidad se conseguieron de la estratigrafía publicada en los expedientes recopilados de la DGA. Estos datos serán trabajados mediante el programa *Strater* para generar columnas estratigráficas y poder realizar 4 secciones geológicas en la zona, dos en sentido norte—sur y otras dos en sentido este—oeste.

Los sedimentos registrados en los expedientes de la DGA no poseen una nomenclatura en común. La información de los expedientes se homogenizará con el triángulo de Shepard (1954) para clasificar sedimentos de acuerdo a su granulometría. Hay que mencionar que en lugar de limos, este trabajo ocupa arcillas para mantener la congruencia con las descripciones estratigráficas de los expedientes de la DGA.

La información estratigráfica será clave para estimar el potencial específico de extracción de calor del suelo; esto será mejor detallado más adelante.

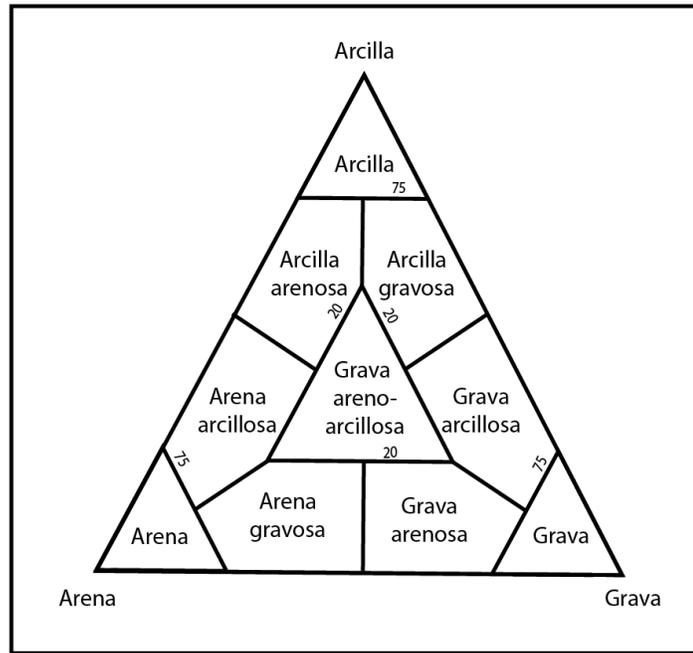


Figura 30: Sistema de clasificación de Shepard, recomendado para la clasificación de sedimentos (Shepard, 1954).

3.2.3 Conductividad hidráulica y transmisividad

La estimación de la transmisividad se realiza con la ayuda del *software Aquifer Test* a partir de las pruebas de bombeo de gasto constante de 57 pozos. Las simulaciones se realizan con el método de Theis.

Luego se obtuvo la conductividad hidráulica (K) mediante la ecuación 11, que relaciona la transmisividad (T) y el espesor saturado (e) (Gonzalez de Vallejo *et al.*, 2002).

$$K \left[\frac{m}{s} \right] = \frac{T \left[\frac{m^2}{s} \right]}{e [m]} \quad (11)$$

3.2.4 Dirección del flujo de aguas subterráneas, gradiente hidráulico y velocidad real.

La dirección de flujo de las aguas subterráneas se determina a partir del resultado obtenido para las cotas hidráulicas. La pendiente entre cotas representa al gradiente hidráulico de la zona según la diferencia entre niveles estáticos locales. Esta estimación se realiza mediante la herramienta de *ArcGis*, *Flow Direction*, del catálogo de herramientas de *Hydrology*, que permite conocer la dirección del flujo local a partir de la imagen *raster* que contiene valores de cotas hidráulicas.

Para obtener el gradiente hidráulico se genera una imagen *raster* que contiene la información de la pendiente máxima en cada punto mediante una herramienta de *ArcGis* llamada *Slope*. Para crear esta nueva superficie se ingresó la información de cotas hidráulicas. La pendiente se calcula a partir de la expresión dada en la ecuación 12, donde el gradiente (i) es porcentual y el ángulo (θ) representa al ángulo de mayor pendiente de cada punto respecto a los puntos vecinos.

$$i = 100 * \tan \theta \quad (12)$$

Una vez obtenido el gradiente hidráulico se determina la velocidad de Darcy en cada punto donde se calculó la conductividad hidráulica. Se extrae la información de la superficie de pendientes y aplica a la ecuación 13. En la ecuación, es necesario dividir el resultado por 100 debido a que el gradiente hidráulico se ha determinado porcentualmente. Finalmente, la velocidad real es calculada por la ecuación 14 (Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS), 2009), donde se considera un valor de porosidad efectiva (n) igual a 0,2, lo que corresponde al valor mínimo encontrado en suelos compuestos de gravas y arenas.

$$v_{Darcy} \left[\frac{m}{s} \right] = K \left[\frac{m}{s} \right] \frac{i}{100} \quad (13)$$

$$v_{real} \left[\frac{m}{s} \right] = \frac{v_{Darcy} \left[\frac{m}{s} \right]}{n} \quad (14)$$

3.2.5 Temperatura del agua subterránea

Los datos de temperatura en aguas subterráneas fueron tomados en terreno de 11 pozos. Estos datos han sido trabajados mediante un *kriging* ordinario simple con anisotropía para obtener una superficie estimada de temperaturas.

3.3 Propiedades térmicas del suelo

3.3.1 Parámetros termales

Los resultados medidos en cada coordenada geográfica serán correlacionados con la unidad litológica correspondiente al mapa geológico de la figura 15 y se estimará un valor promedio de difusividad termal en Osorno.

3.3.2 Potencial de extracción de calor específico

Este parámetro se obtiene a partir de la información estratigráfica recopilada de la zona de estudio (76 pozos profundos), la que esta contenida en los planos de construcción de captaciones de aguas subterráneas de la DGA. Con esto se determina la naturaleza del relleno sedimentario en diferentes niveles, lo que permite estimar el Potencial de Extracción de Calor sHE (según sus siglas en inglés, *specific Heat Extraction*) asociado a cada tipo de sedimento (tabla 10), parámetro necesario utilizado para estimar la energía geotermal disponible en sistemas verticales cerrados.

Tabla 10: Valores típicos de sHE para diferentes tipos de sedimentos. Fuente: Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2004).

Tipo de roca	sHE [W/m] para 2400 hr
Grava, arena seca	<20
Grava, arena saturada	55-56
Grava, arena bajo un fuerte flujo de agua subterránea	80-100
Arcillas, limo y fango	30-40

Los valores expuestos en la tabla 10 corresponden a la potencia que se puede extraer por cada metro de pozo (Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 2004)). Gamelli *et al.* (2011) indica que para cada punto en que se desee estimar el sHE medio hay que multiplicar el sHE promedio de la roca por el espesor del estrato, para cada sitio el sHE promedio se calcula mediante la ecuación 15, donde sHE_k representa la extracción de calor específico en cada capa k y Th_k representa el espesor de cada capa.

$$sHE_{promedio} = \frac{1}{Th_{total}} \sum_{k=1}^n (sHE_k \times Th_k) \quad (15)$$

Por otra parte, Pipelife (2015) propone que la potencia de extracción del suelo depende de la humedad y del contenido mineral del suelo, otorgando valores del potencial de extracción de calor para distintos tipos de suelos por metro cuadrado (tabla 11)

Tabla 11: Valores típicos del potencial de extracción de calor de una superficie para diferentes tipos de suelo. Fuente: Pipelife (2015).

Tipo de suelo	Máxima energía específica de extracción [W/m ²]	
	A 1800 horas/año	A 2400 horas/año
Suelo seco	10	8
Suelo cohesivo, húmedo	20-30	16-24
Gravas o arenas saturadas	40	32

3.3.3 Estimación de la temperatura del suelo

Para la estimación de la temperatura del suelo se utiliza como dato la temperatura ambiente horaria registrada durante el año 2016 en la estación meteorológica Osorno, ubicada al norte de Osorno como se indica en la figura 7. Los datos se obtienen del sitio web <https://agromet.cl/datos-historicos>

La estimación de la temperatura en el subsuelo a una profundidad de 1,5 [m] y otras profundidades se calculará a partir de la ecuación 16, propuesta en el trabajo de Andújar *et al.* (2016).

$$T_{suelo}(z, t) = T_m - T_p e^{-z\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}} \cos(\omega t - \varphi - z\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}) \quad (16)$$

De la ecuación anterior se tiene que la temperatura del suelo es una función del tiempo y de la profundidad. Se define cada parámetro como:

T_m : Temperatura promedio del suelo anual, comúnmente tiende a la temperatura promedio anual del aire [°C].

T_p : Amplitud [°C] semidiferencia entre el valor máximo y mínimo de la temperatura media diaria registrada en el año.

t : Tiempo en segundos [s].

z : Profundidad a la que se desea estimar la temperatura [m].

ω : Frecuencia angular [rad/s]. $\omega = 2\pi/T$ donde T corresponde al periodo del senoide de un año bisiesto, es decir, 366x24x3600 [s]].

φ : Fase [rad]. Esta fase representa un retardo o un adelanto entre la onda generada entre la temperatura ambiente anual y la temperatura del suelo anual.

α : Difusividad termal del suelo [m²/d]

3.4 Demanda térmica

Para determinar la demanda térmica se establecerán zonas de interés según la información publicada en el Plan Regulador Comunal (PRC) vigente en la ciudad de Osorno y la Ordenanza Local del 2007. Se utilizará el informe generado por UNTEC (2014) y el informe de CREARA (2013), que definen demandas térmicas asociadas a tipologías de viviendas. En el programa *Google Earth* se realiza un barrido de la ciudad de Osorno para corroborar que el tipo de vivienda que existe en cada lugar corresponda a la normativa existente en cada zona. El PRC de Osorno se obtiene del sitio web http://ide.cl/descargas/capas/minvu/PRC-Los_Lagos.rar y según el análisis en *Google Earth* será modificado mediante la unión de zonas y corrección de polígonos en *ArcGis*.

Mediante el PRC y la ordenanza local del año 2007, cada zona será dotada de información de superficie predial mínima, coeficiente de ocupación máxima de suelo y sistema de agrupamiento de las edificaciones. Luego, estos datos serán presentados en una tabla para ser relacionados a las tipologías de vivienda definidas en los informes de la UNTEC y CREARA. El parámetro crítico para relacionar la información corresponde a la superficie predial mínima (SPmín), calculada mediante la ecuación 17.

$$SP_{mín} [m^2] = Superficie\ útil [m^2] + Superficie\ intercambiadores [m^2] \quad (17)$$

La UNTEC presenta 9 tipologías de viviendas típicas en Chile, asociándoles una superficie útil y un sistema de agrupamiento. Poseen una demanda típica estándar asignada mediante la metodología del trabajo de RETScreen International (2005), la que considera un balance entre ganancias y pérdidas de carga térmica [W/m²]. Además se encuentra corregida para mejorar la repetitividad de la metodología en Chile. La demanda energética de cada tipología de vivienda está calculada para tres periodos de tiempo.

En el informe de CREAMA se presentan 9 tipologías de viviendas típicas de Osorno. Finalmente se realizará una correlación de la información para generar una nueva zonificación a partir de zonas de interés en la ciudad respecto a la demanda energética a suplir.

3.5 Sistemas de información geográfica (SIG)

El software que se utiliza para trabajar las diferentes capas de información corresponde a *ArcGis 10.3*. Con el catálogo de herramientas, se trabajará la información mediante vectores e imágenes *raster*. La información será presentada en mapas con diferentes simbologías según sea el caso, con dos escalas: 1:75.000 cuando se quiere mostrar lo que ocurre localmente en Osorno y 1:150.000 para mostrar la zona de estudio. Hay que mencionar que los mapas se realizan en sistema de coordenadas UTM en el Datum WGS1984 18S.

Una de las principales herramientas para interpolar la información puntual recopilada y generar superficies continuas corresponde a *Geostatistical Analyst* (Análisis de estadísticas geográficas). Se utiliza el método de *kriging* ordinario circular con anisotropía. Este corresponde a un método de interpolación que utiliza una media de la población de datos que es desconocida y que se asume constante. El método es bastante flexible y útil cuando los datos parecieran tener una tendencia. El *kriging* en sí, permite describir y modelar patrones espaciales, predecir valores no medidos en ciertos lugares y evaluar la incertidumbre asociada.

También se utiliza la caja de herramientas del *Spatial Analyst Tools*, de donde se usan herramientas de la sección *Hydrology, Surface, Map algebra, Extraction* para trabajar a partir de imágenes *raster*. Mientras que los vectores serán trabajados principalmente con la caja de herramientas *Analyst Tools*.

3.6 Sistemas horizontales cerrados

Determinar el potencial de extracción consiste en una serie de procedimientos. Para las bombas de calor acopladas a sistemas horizontales cerrados, hay que tener en cuenta que la mayor limitante es la superficie disponible para la instalación de los colectores. Dado lo anterior, es importante conocer el área disponible para la instalación de colectores horizontales en cada vivienda o predio.

A partir del trabajo realizado en el plan regulador, se tiene una zonificación de la ciudad de Osorno asociada a ciertas demandas térmicas que, además, considera parámetros como la superficie predial mínima (SP_{mín}) y el coeficiente de ocupación de suelo (COs). Luego se correlacionará esta información con las tipologías de viviendas del informe de UNTEC (2014) y CREAMA (2013) mediante criterios espaciales, estructurales y socioeconómicos. Así se obtendrá una demanda típica para cada zona de interés definida a partir del PRC.

Paralelamente, se obtendrá el COP asociado a la evolución de la temperatura del suelo en el tiempo. La Eficiencia de Carnot en modo calefacción se calcula a partir de la ecuación 8, sin embargo, hay que tener algunas consideraciones con la temperatura.

$$T_h = T_{comfort} + 18^\circ C \quad (18)$$

$$T_f = T_{w,og} - 5^\circ C \quad (19)$$

$$T_{w,og} = T_g - 10^\circ C \quad (20)$$

En la ecuación 18 se tiene que la temperatura del foco caliente, correspondiente a la temperatura del condensador (la que será distribuida hacia la vivienda), debe ser mayor en un rango de 15 a 20 [°C]. Se toma una diferencia de 18 [°C] basada en la norma establecida por la American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, INC. (2008) y se determina, a partir del trabajo de Molina & Veas (2012), que la temperatura de confort es aquella donde la sensación térmica no genera frío ni calor. Esta equivale a 20 [°C] cuando la temperatura ambiente es menor que 18 [°C] y a 24 [°C] cuando es mayor que este valor.

La ecuación 19 define la temperatura del foco frío de la bomba de calor (T_f), es decir, el evaporador. Esta corresponde a la temperatura del fluido que llega al evaporador ($T_{w,og}$) y que según el estándar definido por la American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, INC. (2008) considera una diferencia mínima de 5 [°C] para que la transferencia de calor sea efectiva. Además, la temperatura del fluido ($T_{w,og}$), ya ha sido influenciada por el intercambio de calor generado entre el suelo (T_g) y el fluido, entonces se considera una diferencia de 10 [°C] como muestra la ecuación 20. La temperatura del suelo utilizada se obtiene mediante la ecuación 16.

Con esta información se puede determinar el área que deberá ocupar un colector horizontal para obtener la energía requerida para satisfacer la demanda térmica. Esta área, según el trabajo de Sarbu & Sebarchievici (2016), se calcula a partir de la ecuación 21, donde q_E es el potencial de extracción específico del suelo y se obtiene de la tabla 11.

$$A = \frac{Q_T}{q_E} = \frac{Q_{HP} - P_e}{q_E} \quad (21)$$

De acuerdo con la relación propuesta en la ecuación 9 y a la ecuación 21 se obtiene la ecuación 22.

$$A = \frac{Q_s}{q_E} \left(\frac{COP}{COP - 1} \right) \quad (22)$$

3.7 Sistemas verticales abiertos

Una de las principales limitantes en sistemas verticales abiertos es la disponibilidad del agua subterránea, ya que podría ser insuficiente para aplicar una bomba de calor y, por ende, se tiene que conocer la profundidad que se debe perforar para encontrar el acuífero

que se explotará. Por otra parte, existen normativas legales que regulan la ocupación de las aguas subterráneas mediante el Código de Aguas.

La eficiencia de este sistema se determinará mediante la herramienta *raster calculator* de *ArcGis*, considerando la imagen *raster* generada para la temperatura mediante la ecuación 8.

En primer lugar, se calcula la tasa de bombeo requerida para cierta demanda establecida, el caudal (Q) [L/s] será una función de las propiedades físicas del agua y la diferencia de temperatura entre el fluido que entra y sale en la bomba de calor, es decir, la diferencia de temperatura entre el agua que es extraída y reinyectada. En la ecuación 23, se tienen como parámetros físicos del agua a la densidad del agua (ρ) y el calor específico (c_p); sus valores en condiciones normales de presión y temperatura son 998,29 [kg/m³] y 4186 [J/kgK], respectivamente.

$$Q = \frac{P}{\rho c_p \Delta T} \quad (23)$$

La temperatura de la fuente, el agua subterránea, se obtendrá a partir de las mediciones realizadas en terreno según el tratamiento descrito anteriormente. El caudal que se utilizará corresponde a un estudio estadístico de la población de caudales concedidos en los derechos de aguas; así, se considera el caudal correspondiente a diferentes percentiles de la población de caudales. La diferencia de temperatura sugerida por la norma American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, INC. (2008) es de 3 [K].

Por otro lado, para asegurar la disponibilidad, será necesario encontrar una profundidad de perforación óptima, que asegure al menos alcanzar el nivel estático considerando sus variaciones. Estas variaciones estarían dadas por el abatimiento de los pozos; también hay tener en cuenta este sistema debe contar con un pozo para extracción del recurso y otro de reinyección. Para esto se usa la ecuación 24.

$$Z_{GWHP} = 2 * NE + Z_{abatimiento} \quad (24)$$

Para calcular el abatimiento (S_w), se tiene la ecuación 25:

$$S_w = NE - ND \quad (25)$$

3.8 Sistemas verticales cerrados

Los sistemas verticales cerrados suelen ser una buena opción si la roca madre se encuentra cercana a la superficie, cuando se desea reducir al mínimo el espacio de instalación de colectores o cuando no se desea perturbar el entorno. Si bien son mucho más eficientes, la instalación generalmente es económicamente más costosa.

De acuerdo con la metodología expuesta en el trabajo de Muñoz *et al.* (2015), se busca satisfacer una demanda a partir de la energía disponible. Entonces se utilizará la demanda térmica para estimar el potencial de extracción de calor del suelo mediante la tabla modificada en el trabajo de Gamelli *et al.* (2011), considerando que se debe realizar

una estimación del sHE para suelo seco y saturado mediante las ecuaciones 26 y 27, respectivamente.

$$sHE_{seco} = \frac{1}{Th_{seco}} \sum_{k=1}^n (sHE_k \times Th_k) \text{ si } Th_i < NE \quad (26)$$

$$sHE_{saturado} = \frac{1}{Th_{saturado}} \sum_{k=1}^n (sHE_k \times Th_k) \text{ si } Th_i \geq NE \quad (27)$$

De este modo, el sHE en cada capa dependerá del contenido del agua y la velocidad de esta. El cálculo de la profundidad que debe ser perforada (Th) para sustituir la demanda térmica (P), se calcula a partir de la ecuación 28.

$$Th = \frac{P}{sHE} \quad (28)$$

3.9 Herramienta de decisión

Para cada tipo de sistema se calcula, además, parámetros económicos como una variable crítica. Estos costos se obtienen mediante cotizaciones. Finalmente, luego de analizar cada capa de información por separado se decidirá, considerando criterios espaciales, legales y económicos, qué tipo de bomba de calor acoplado a algún tipo de sistema de intercambio de calor es más eficiente al momento de satisfacer la demanda en cada zona de interés.

4 RESULTADOS

4.1 Propiedades hidrogeológicas

4.1.1 Base de datos

Se genera una base de datos (anexo 5) con parámetros hidrogeológicos, compuesta por 96 datos. De estos hay 85 datos obtenidos de expedientes de pozos profundos publicados por la DGA y 11 datos medidos en terreno (8 mediciones de niveles estáticos).

Cada dato se ha recopilado de material datado desde el año 2000, incluyendo documentos de pruebas de bombeo y descripciones estratigráficas. Se tienen datos de caudales concedidos, niveles estáticos y niveles dinámicos. Dentro de la base de datos no se consideran datos duplicados ni aberrantes. Del mismo modo se observa que cada dato presente una coherencia geoespacial para mejorar la representatividad del estudio.

4.1.2 Perfiles geológicos esquemáticos

De los expedientes de pozos publicados por la DGA, se extrae la información estratigráfica de 24 pozos para realizar 4 secciones geológicas esquemáticas. Dos de estas secciones esquemáticas con orientación este-oeste (figuras 32 y 33) y otras dos orientadas norte-sur (figuras 34 y 35). La vista en planta de los perfiles se encuentra en la figura 31.

Debido a la complejidad estratigráfica presente en la zona, se agrupan unidades de acuerdo a la granulometría de los sedimentos, diferenciando tres grupos: a) grava, arena y grava arenosa; b) grava y arena en matriz de arcilla; y c) arcilla. Además, para cada pozo se grafica la ubicación de cada criba captante.

Los depósitos tienden a profundizarse hacia el sur y en menor medida hacia el oeste. Por otra parte, no se observa una tendencia clara respecto al tamaño de sedimentos en profundidad, aunque existen intercalaciones entre unidades de diferente granulometría. Los sedimentos más finos se hallan cercanos a la superficie.

Se pueden mencionar tres potenciales zonas acuíferas asociadas a los sedimentos más gruesos. El nivel más superficial se encuentra parcialmente cubierto con capas de sedimentos de granulometría fina a gruesa, pero aflora localmente en los valles de los principales ríos. Las otras dos unidades están cubiertas por capas que varían entre sedimentos de granulometría fina a gruesa. Para el posterior desarrollo de resultados, estas unidades serán denominadas como: acuífero superior, acuífero intermedio y acuífero inferior. En las figura 32, 33, 34 y 35; se observa el acuífero superior cercano a la superficie, mientras que los acuíferos intermedio e inferior pueden estar separados por sedimentos más finos como se observa en la figura 35 o pueden estar en contacto como se ve en las figuras 32 o 33.

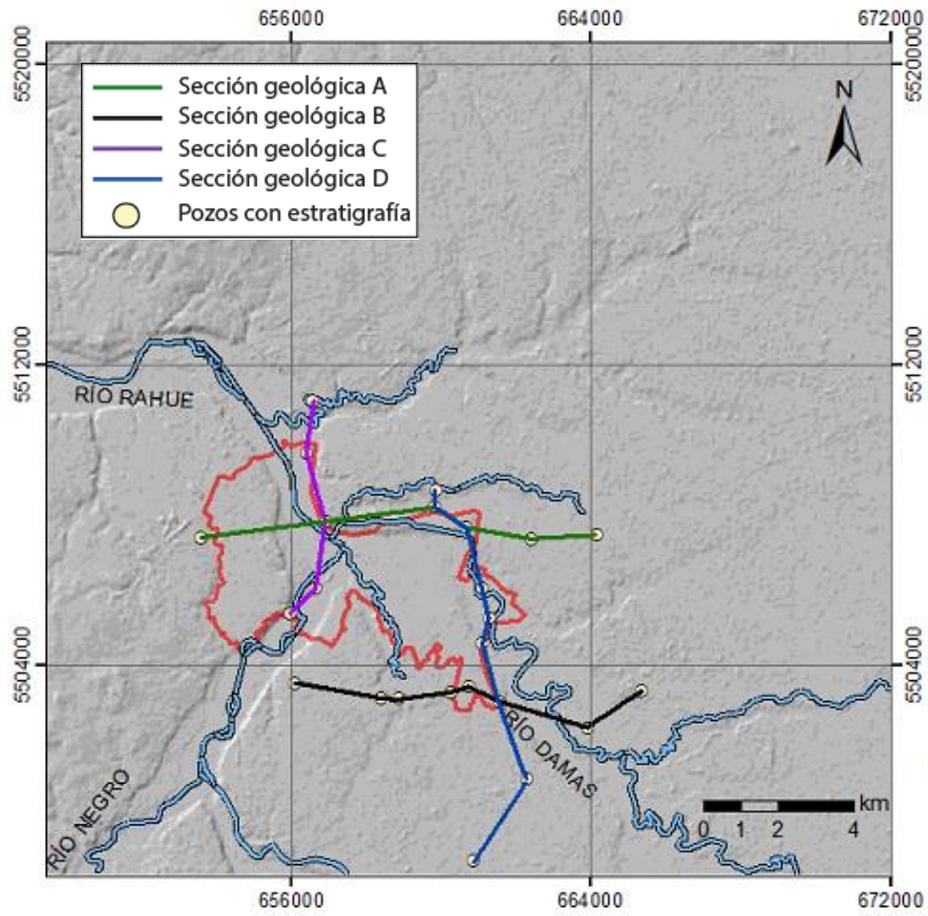


Figura 31: Vista en planta de las secciones esquemáticas A, B, C y D y ubicación de los pozos utilizados para realizar dichas secciones (Escala:1:150000). Fuente: elaboración propia.

Sección geológica A

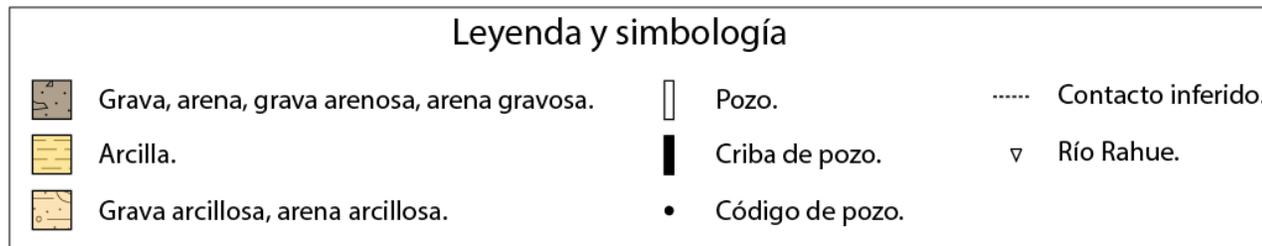
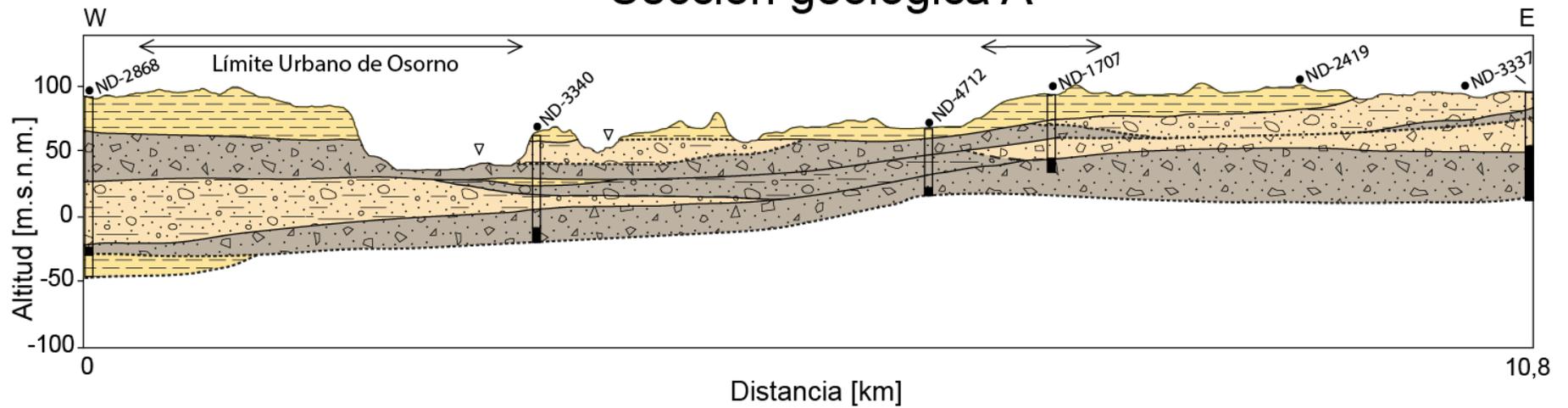


Figura 32: Sección geológica esquemática A orientada de oeste a este en el sector norte de la zona de estudio. Línea verde en la figura 31. Fuente: elaboración propia.

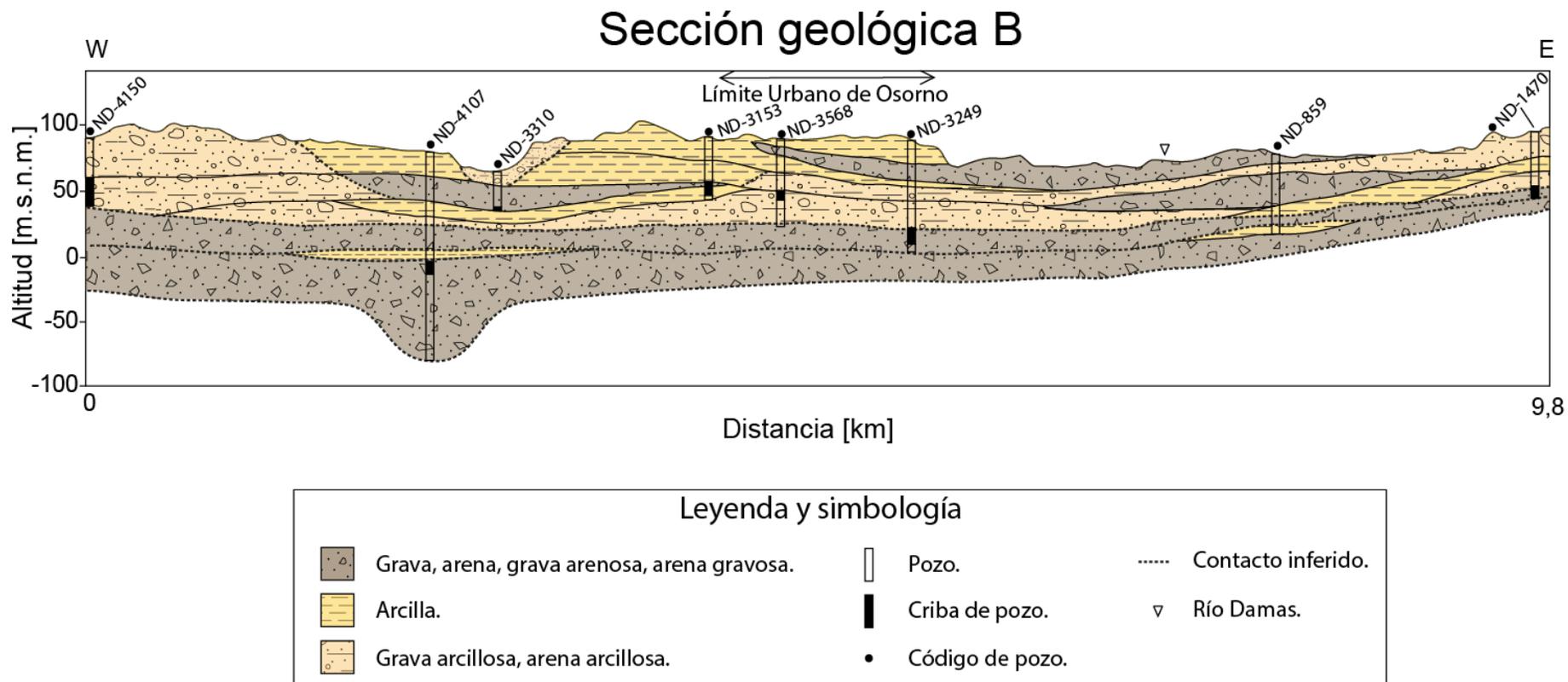


Figura 33: Sección geológica esquemática B orientada de oeste a este en el sector sur de la zona de estudio. Línea negra en la figura 31. Fuente: elaboración propia.

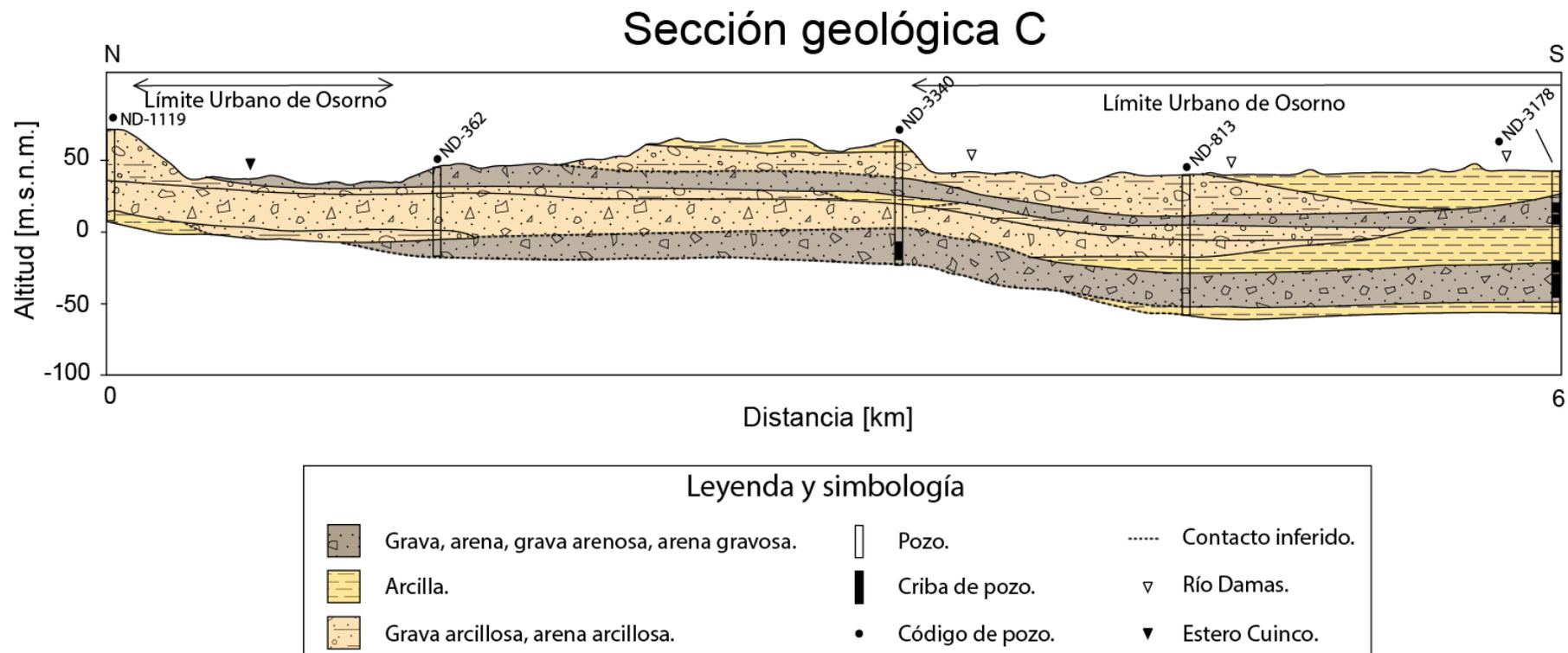


Figura 34: Sección geológica esquemática C orientada de norte a sur en el sector oeste de la zona de estudio. Línea morada en la figura 31. Fuente: elaboración propia.

Sección geológica D

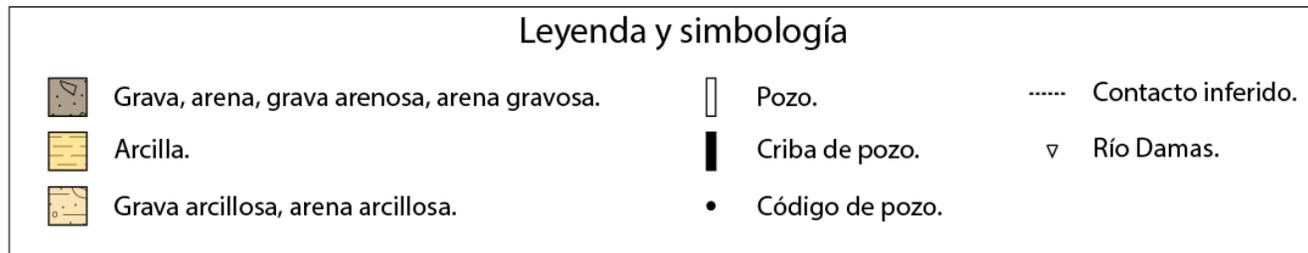
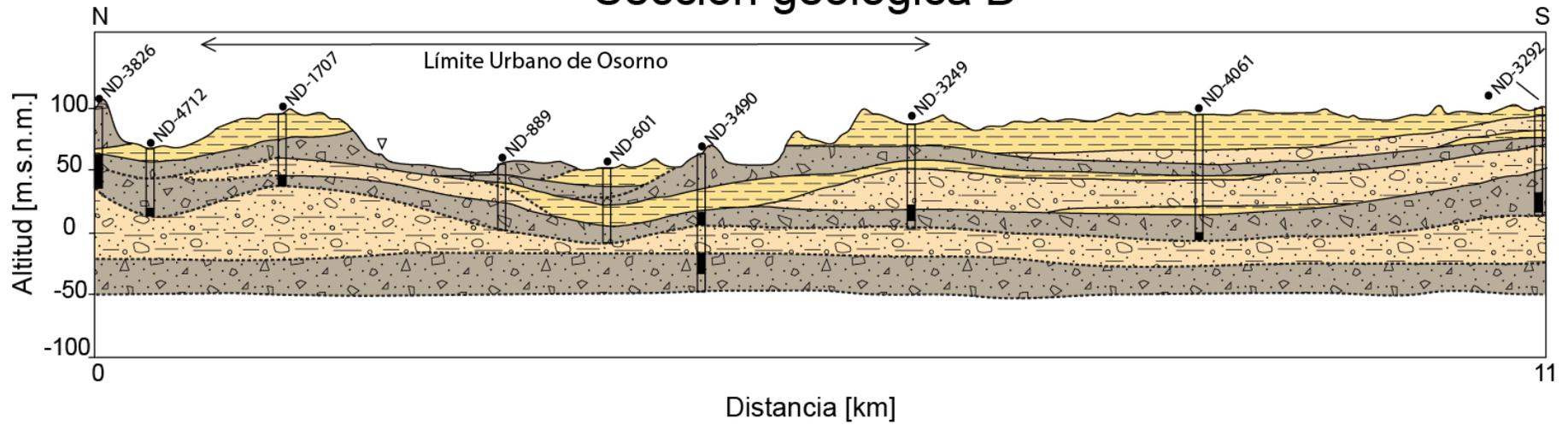


Figura 35: Sección geológica esquemática D orientada de norte a sur en el sector este de la zona de estudio. Línea azul en la figura 31. Fuente: elaboración propia.

4.1.3 Niveles estáticos

De la información recopilada, se interpolan datos de niveles estáticos mediante *kriging* ordinario circular con anisotropía. Se generan dos interpolaciones de niveles: una entre pozos ubicados en los acuíferos libres A1 y B (figura 36); y la segunda, entre pozos ubicados en el acuífero //A2 (figura 37). Se observa que la superficie generada a partir de acuíferos libres presenta profundidades entre 9 [m] y 32,8 [m]. Por otra parte, la superficie generada a partir del acuífero //A2 muestra profundidades del nivel estático entre los 5,5 [m] y 44,6 [m]. Se desprende que los niveles estáticos más profundos se encuentran en zona oeste y, en menor medida, hacia el norte; mientras que los niveles más someros están ligados a los valles del este.

4.1.4 Cotas hidráulicas

Se generan mapas de cotas hidráulicas para diferentes acuíferos (figuras 38 y 39) que representan al nivel de agua subterránea en metros sobre el nivel del mar [m.s.n.m.]. Al igual que para los niveles estáticos, se genera una interpolación para el acuífero //A2 y otra para los acuíferos A1 y B. En el primer caso, las cotas se encuentran entre los 42,8 [m] y 107, 5 [m]; mientras que, en el segundo, se hallan entre los 25,1 [m] y 82,9 [m]. Además, en los mapas hay flechas que indican la dirección y el sentido del flujo de agua. Dado lo anterior, se observa que hay un flujo predominante hacia el oeste de la zona de estudio y en menor medida, hacia el norte. También los acuíferos libres poseen una zona de menor nivel en la confluencia de los ríos Rahue y Damas, al oeste de Osorno.

Según lo expuesto, la proveniencia del agua sería desde los sectores más altos en el este de la zona de estudio, mientras que la descarga de esta sería por el oeste ligado al valle del río Rahue y por el norte hacia el valle del río Bueno (fuera de la zona de estudio).

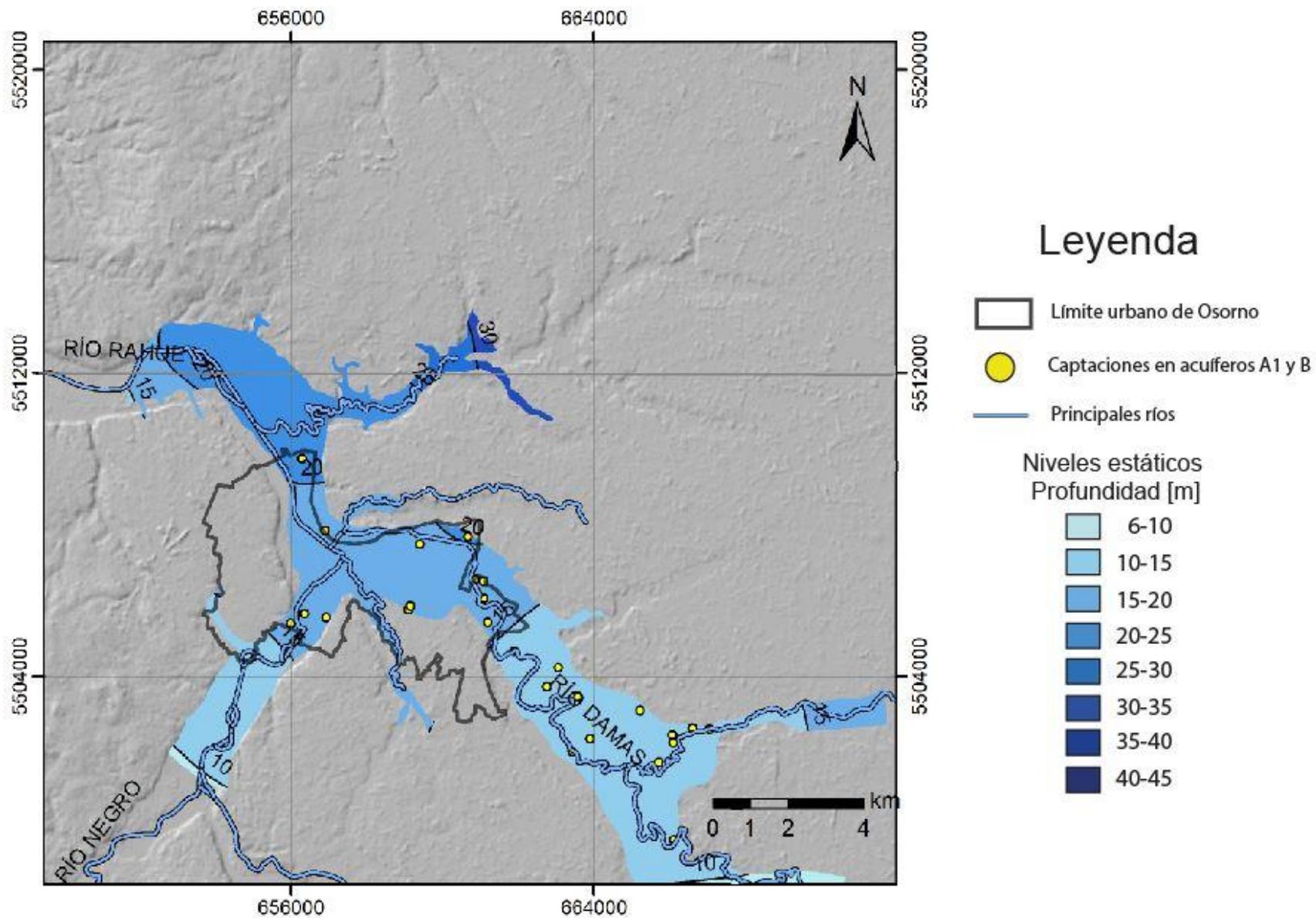


Figura 36: Mapa de interpolación de niveles estáticos en acuíferos libres A1 y B dentro de la zona de Osorno (1:150.000).

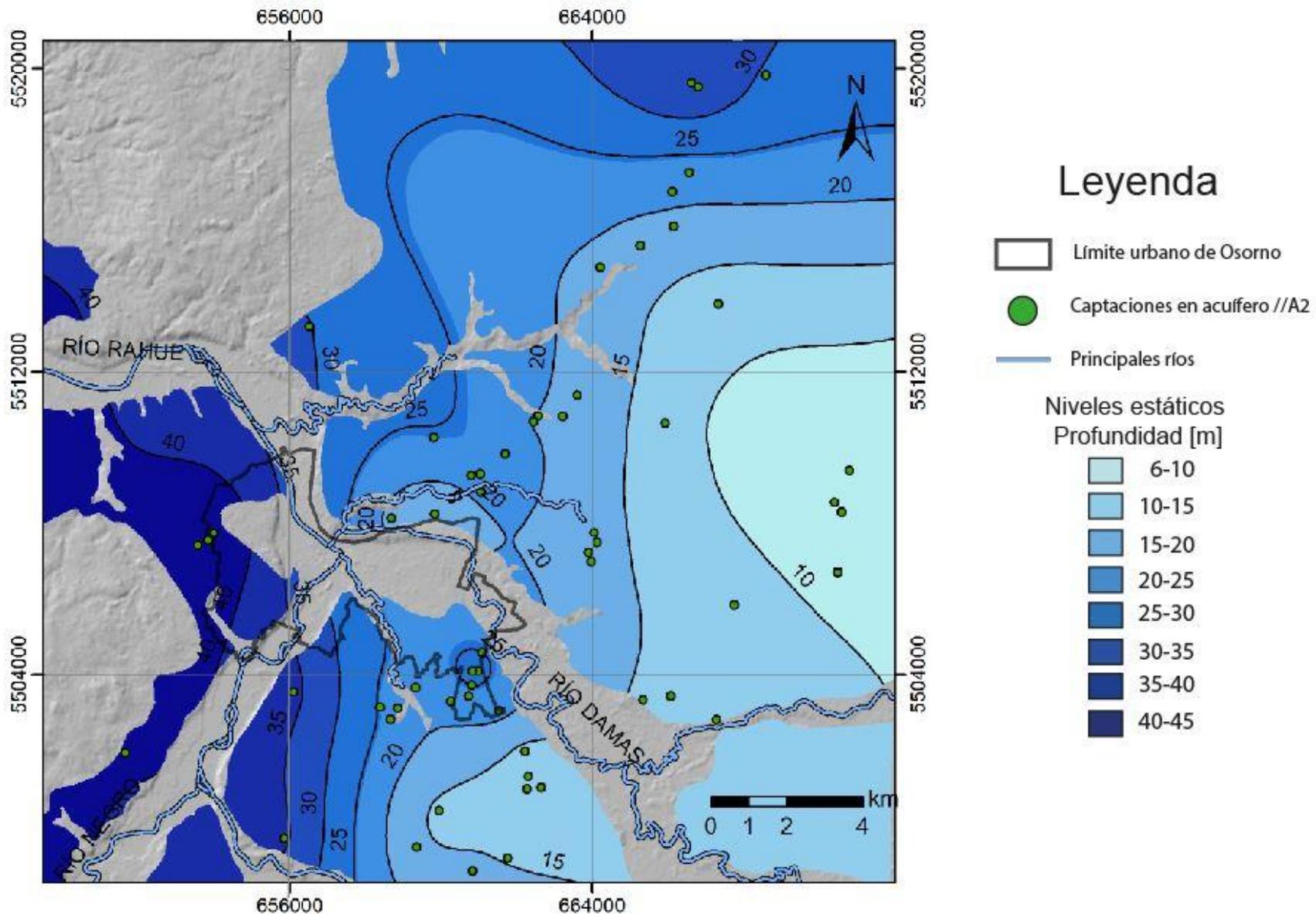


Figura 37: Mapa de interpolación de niveles estáticos en el acuífero //A2 dentro de la zona de Osorno (1:150.000).

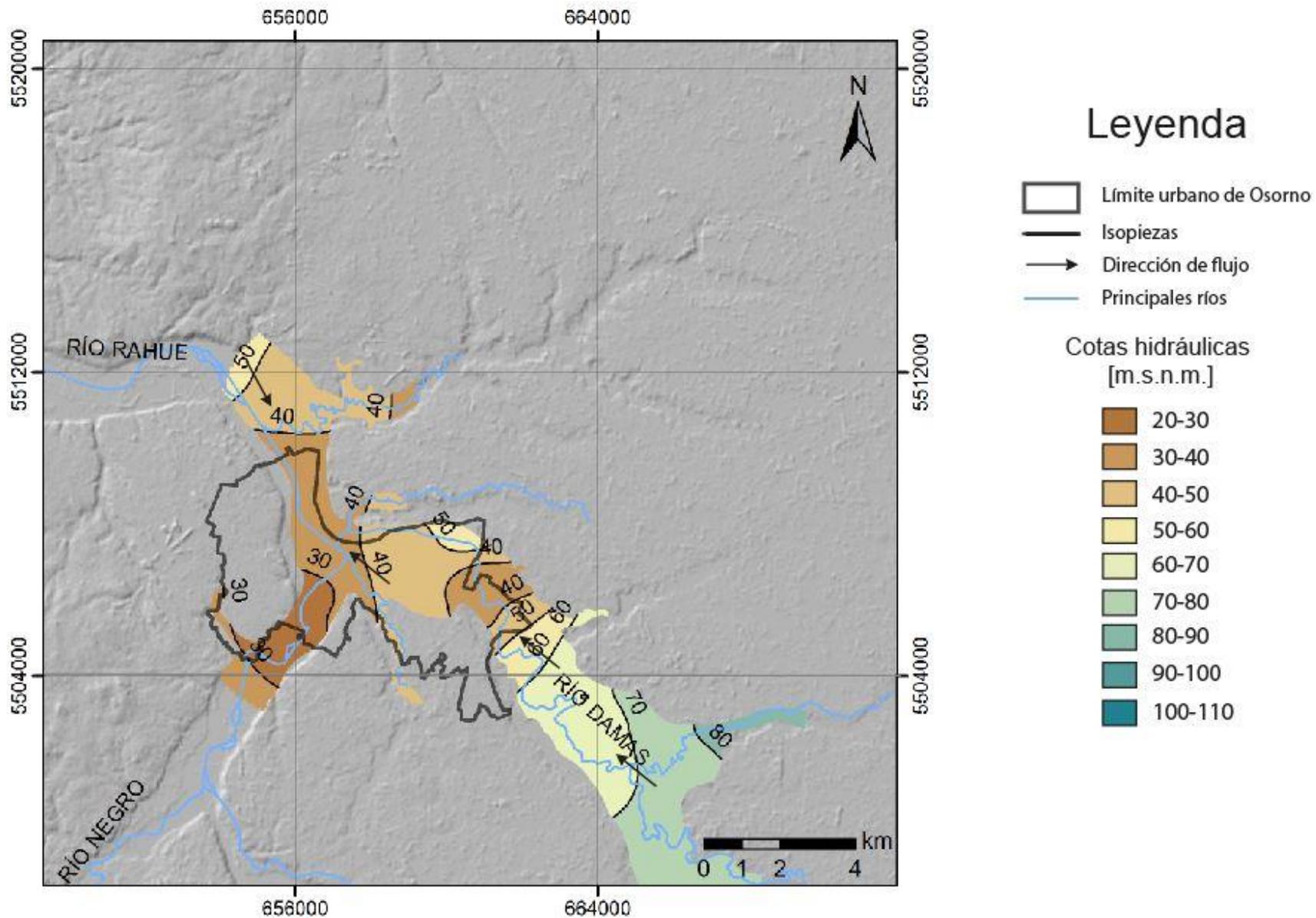


Figura 38: Mapa de interpolación de cotas hidráulicas y dirección del flujo de agua (flechas) en acuíferos libres A1 y B (1:150.000).

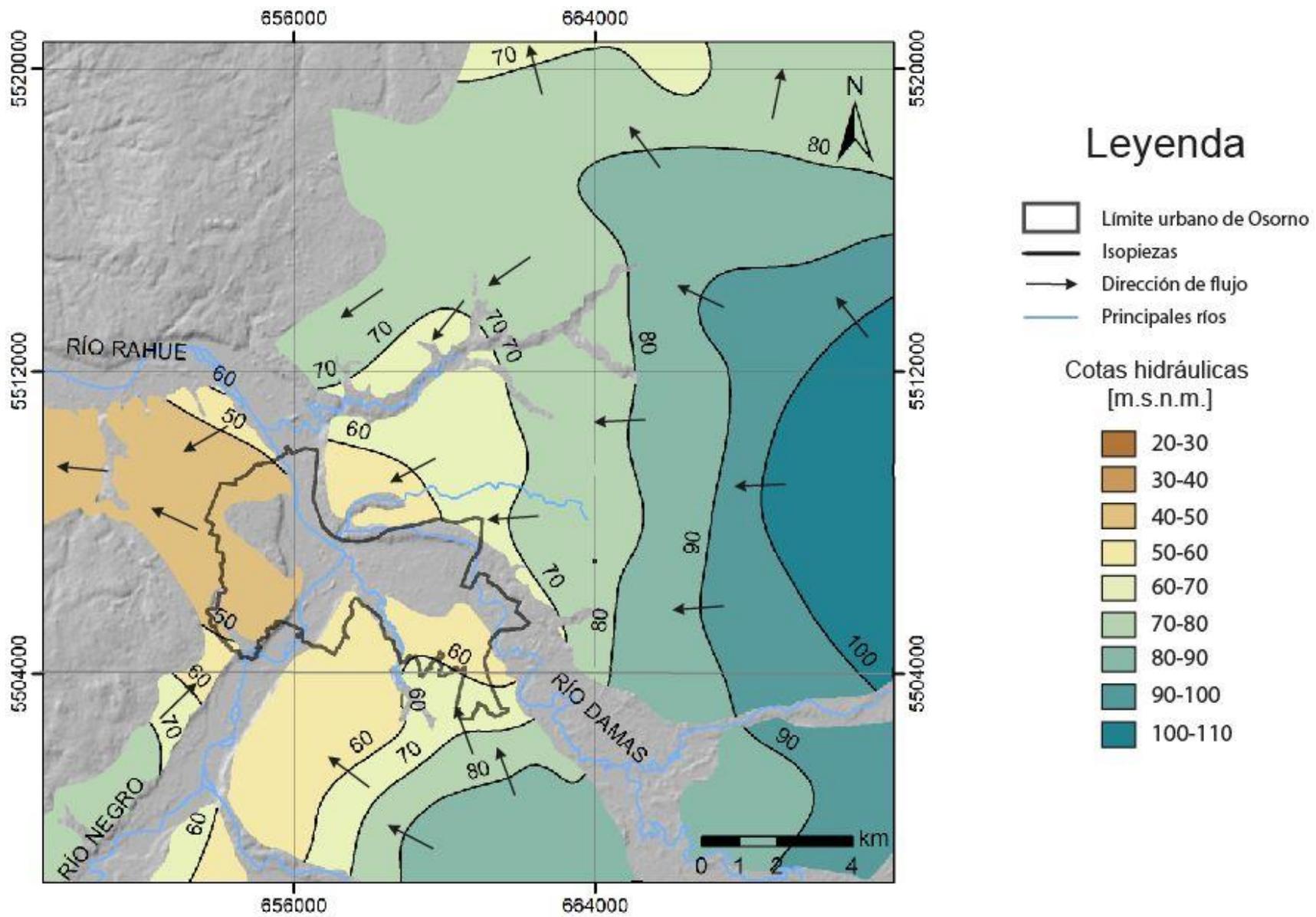


Figura 39: Mapa de interpolación de cotas hidráulicas y dirección del flujo de agua (flechas) en acuífero //A2 (1:150.000).

4.1.5 Abatimiento y caudales

En la figura 40 se muestran los caudales concedidos en los expedientes de pozos de la DGA. Estos caudales varían entre 1 [L/s] y 90 [L/s] y se clasifican en tres rangos representados por el tamaño de cada círculo. Además, mediante una leyenda de colores, se determina a qué unidad hidrogeológica, definida en las secciones geológicas, corresponde el dato. Se observa, en general, que los caudales concedidos son menores a 10 [L/s] y que los valores más altos se extraen desde el acuífero intermedio.

La figura 41 presenta un mapa de abatimientos calculados a partir de niveles estáticos y dinámicos recopilados de expedientes de pozos profundos. Estos se clasifican en tres rangos representados por el tamaño del círculo en cada caso. Los abatimientos varían su profundidad entre 0 [m] y 73,4 [m] y se observa una concentración de abatimientos mayores hacia el oeste de la zona de estudio.

4.1.6 Transmisividad y conductividad hidráulica

A partir de 77 pruebas de bombeo, recopiladas de los expedientes de pozos profundos, se simula el descenso del nivel de agua en el tiempo para una tasa de extracción de caudal constante.

Los resultados de transmisividad (T) se grafican en el mapa de la figura 42. Estos datos se encuentran entre 1 [m²/día] y $1,1 \times 10^5$ [m²/día], siendo separados en 5 rangos representados por tamaño de los círculos para cada dato. Además, los datos se asocian a la unidad en que se capta agua mediante una leyenda de color. Las mayores transmisividades tienden a distribuirse en la zona este, particularmente, en un grupo de datos en el límite este de Osorno.

Por otra parte, los resultados de conductividad hidráulica varían entre $6,9 \times 10^{-2}$ [m/día] y $7,2 \times 10^3$ [m/día], siendo clasificados en 5 intervalos representados por círculos de diferente tamaño (figura 43). Además, se muestra en que unidad se capta el agua mediante una leyenda de color. En general, se observa que los datos se distribuyen homogéneamente, tanto en la zona como en las distintas unidades hidrogeológicas.

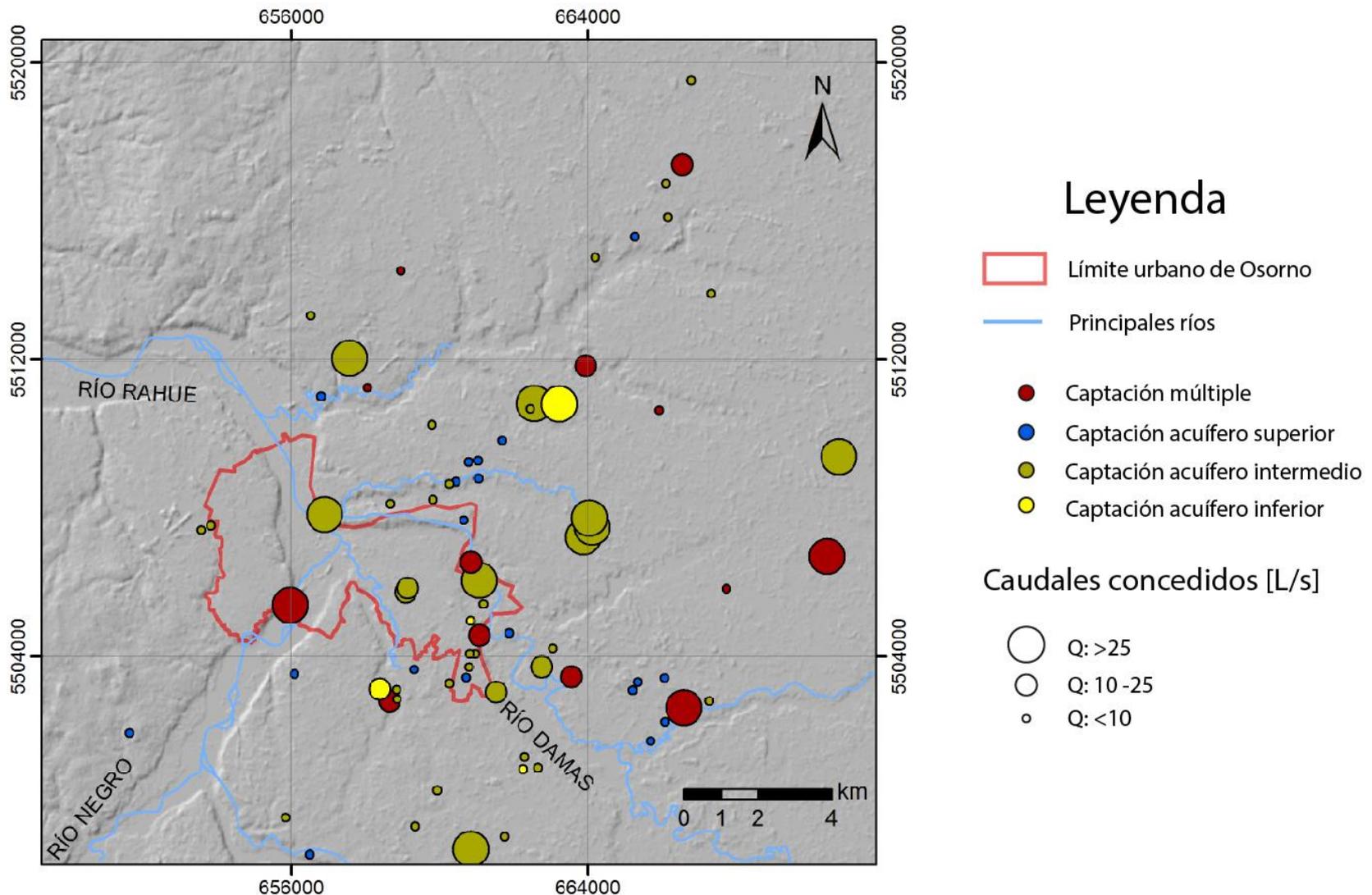


Figura 40: Mapa de caudales (Q) concedidos en captaciones de pozos profundos para la zona de Osorno (1:150.000). Para cada caso se distingue sobre que unidad se capta agua (leyenda de color). Fuente: elaboración propia con datos recopilados de la DGA.

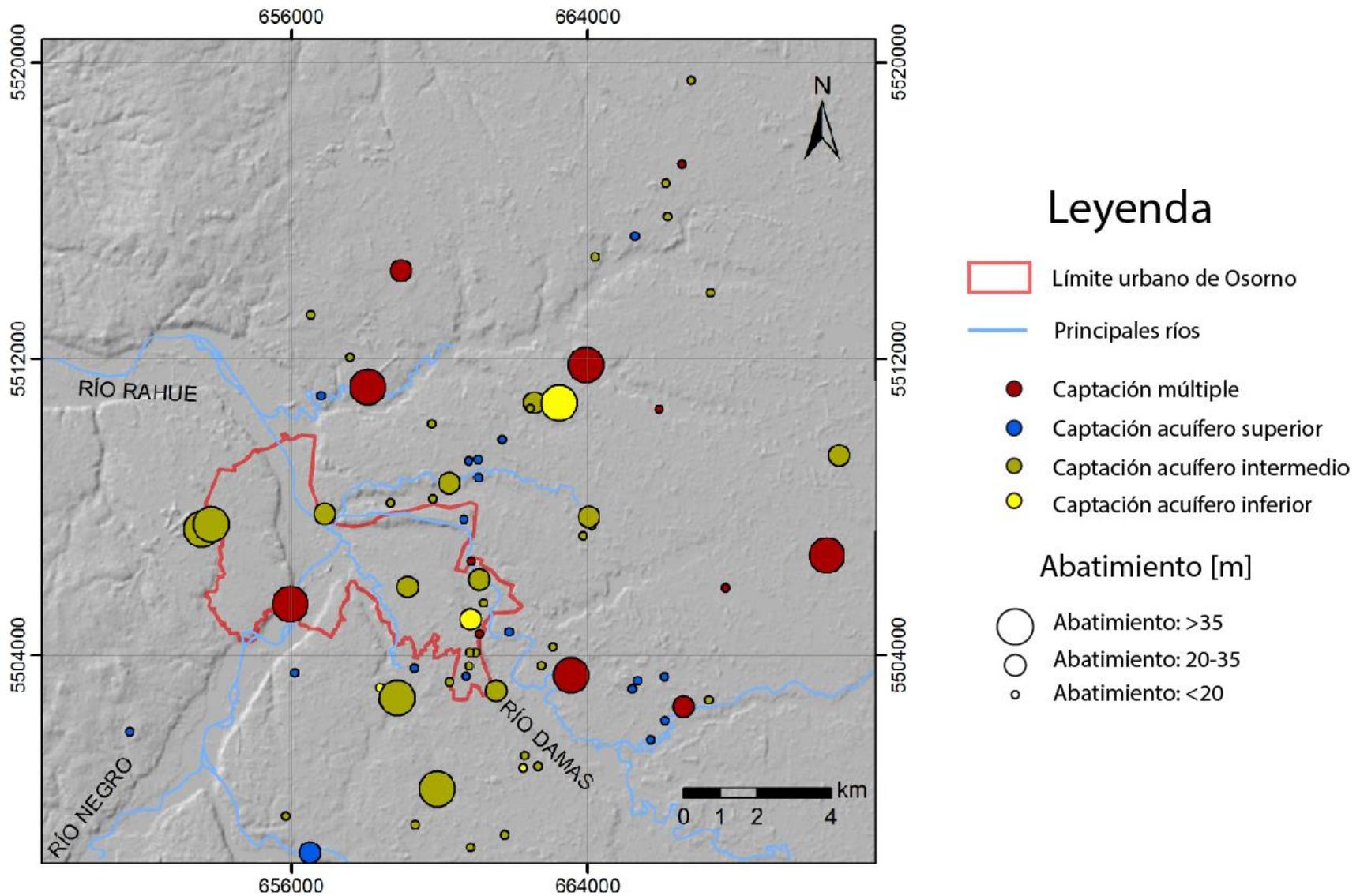


Figura 41: Mapa de abatimientos en captaciones de pozos profundos en la zona de Osorno (1:150.000). Para cada caso se distingue sobre que unidad se capta agua (leyenda de color). Fuente: elaboración propia con datos recopilados de la DGA.

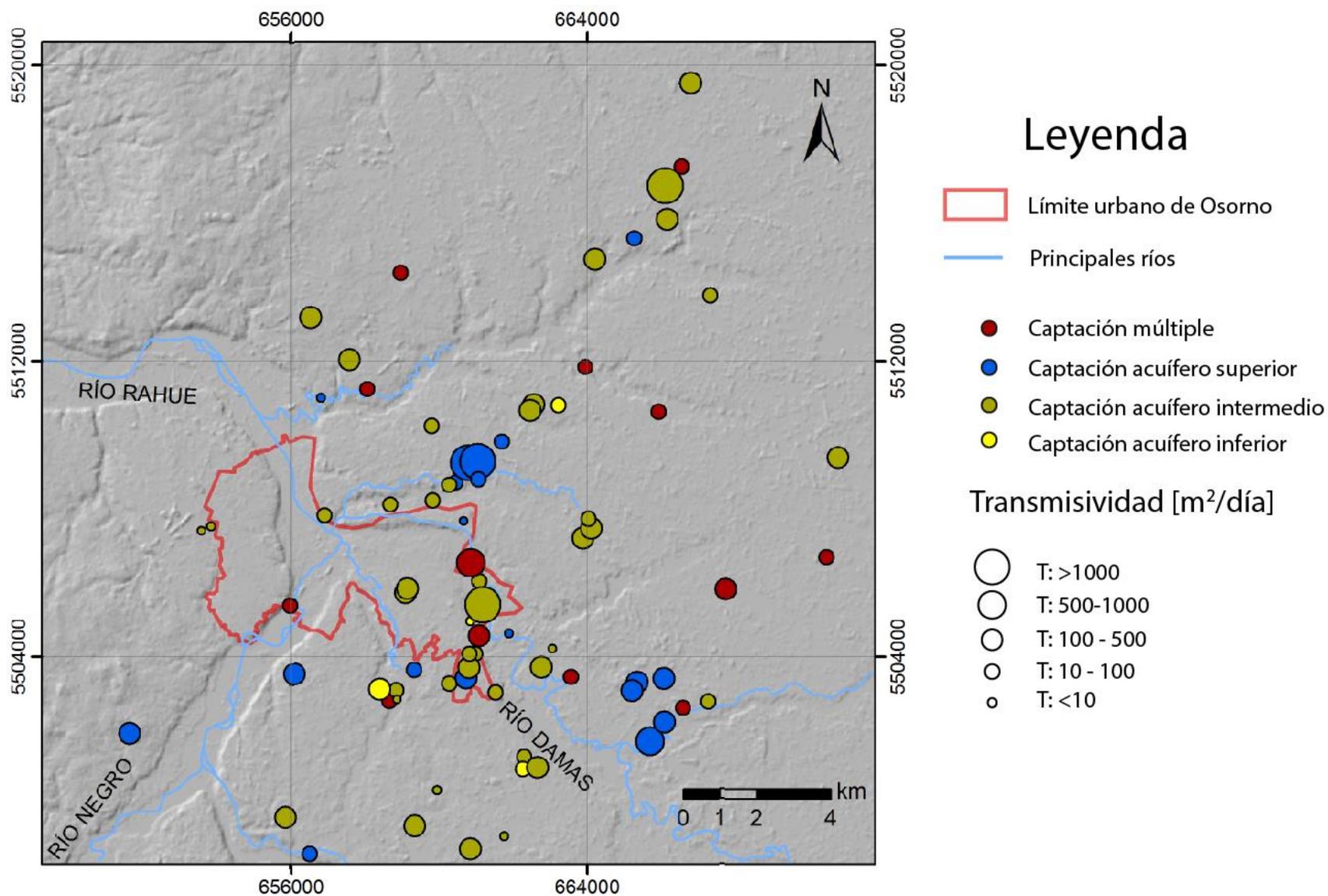


Figura 42: Mapa de transmisividad (T) de captaciones de pozos profundos en la zona de Osorno (1:150.000). Para cada caso se distingue sobre que unidad se capta agua (leyenda de color). Fuente: elaboración propia con datos recopilados de la DGA.

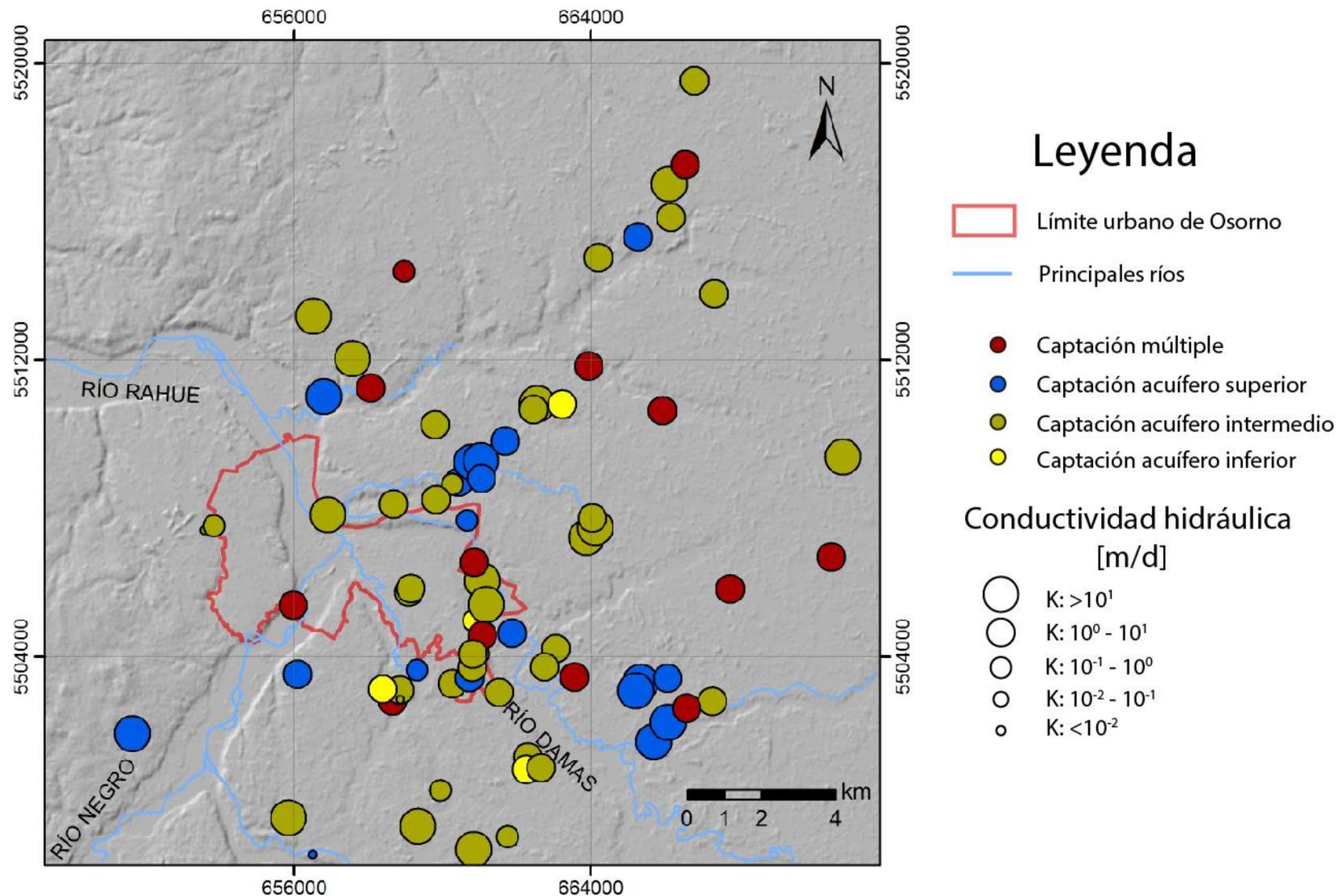


Figura 43: Mapa de conductividad hidráulica (K) en captaciones de pozos profundos en la zona de Osorno (1:150.000). Para cada caso se distingue sobre que unidad se capta agua (leyenda de color). Fuente: elaboración propia con datos recopilados de la DGA.

4.1.7 Velocidad real

A partir de los resultados de cotas hidráulicas, se obtiene un gradiente hidráulico en cada punto (anexo 5). Utilizando los valores obtenidos para la conductividad hidráulica y una porosidad efectiva de 0,2, considerando que las unidades permeables están compuestas principalmente por gravas y arenas de medias a gruesas, se determina la velocidad real para cada dato. Los valores de velocidad real del flujo se encuentran entre 10^{-2} [m/día] y 95,3 [m/día] y se han clasificado en dos grupos (figura 44), considerando un límite de 0,2 [m/día]. Según el trabajo de Angelotti *et al.* (2014), una velocidad real de 0,2 [m/día] puede provocar un aumento del rendimiento de una bomba de calor porque se puede considerar como flujo de alta velocidad. Las mayores velocidades tienden a distribuirse a lo largo del río Damas (figura 44).

4.1.8 Perfiles de temperatura y conductividad eléctrica de aguas subterráneas

Se midieron 8 perfiles de temperatura [°C] y conductividad eléctrica (EC) [$\mu\text{S}/\text{cm}$] (figuras 45 y 46) en pozos profundos distribuidos dentro de Osorno (figura 47). También se midió la temperatura del agua extraída desde una válvula en 3 pozos (tabla 12).

A partir de un mapa de temperaturas y isotermas generadas por interpolación (figura 47), se puede afirmar que esta tiende a ser constante en la ciudad, variando entre los 13,3 [°C] y 14[°C]. Respecto a la variación vertical de la temperatura, se observa en los perfiles que no es significativa. Por otra parte, la conductividad eléctrica (EC) se encuentra entre los 200 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] y 2000 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] (figuras 45 y 46).

Tabla 12: Mediciones de temperatura en pozos desde la superficie por activación de la bomba.

Código de pozo	Coordenada norte [m]	Coordenada este [m]	Altitud [m.s.n.m]	Temperatura [°C]
Os103	5508105	658683	42	13,5
Os206	5506498	661096	58	13
Os305	5503535	660521	71	13,5

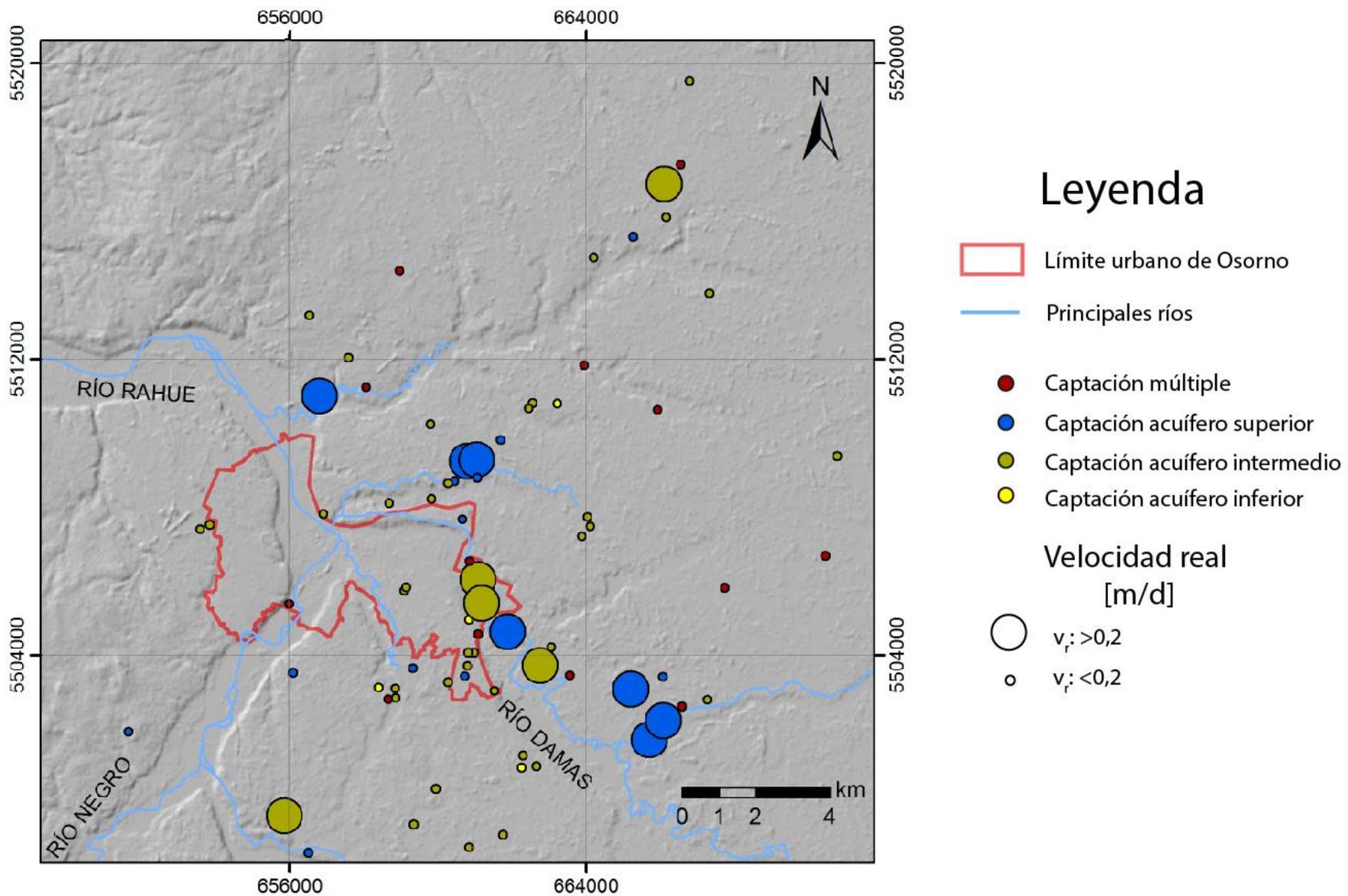


Figura 44: Distribución de la velocidad real (v_r) en Osorno, para identificar la presencia de flujos fuertes de agua subterránea ($>0,2$ [m/día]) (1:150.000).

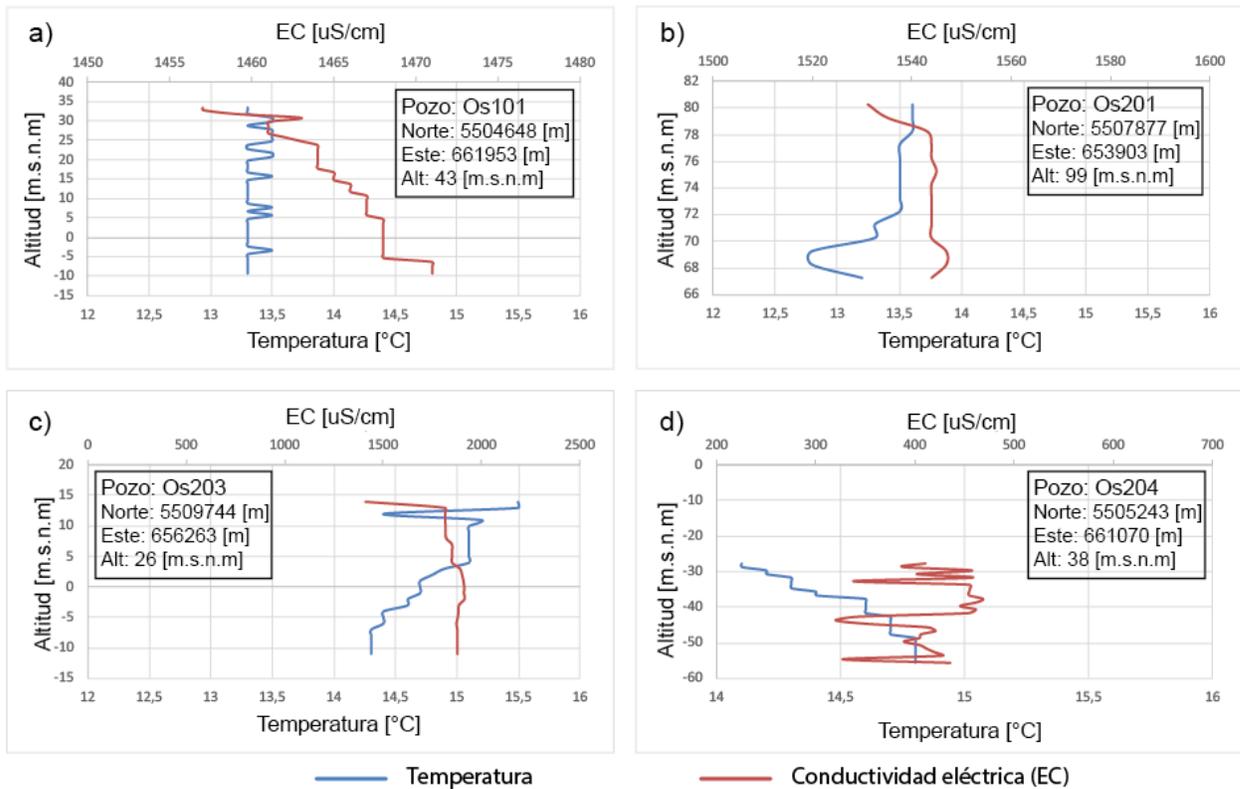


Figura 45: Perfiles de temperatura y conductividad eléctrica en aguas subterráneas medidos en terreno. a) Pozo: Os101. b) Pozo: Os201. c) Pozo: Os203. d) Pozo: Os204.

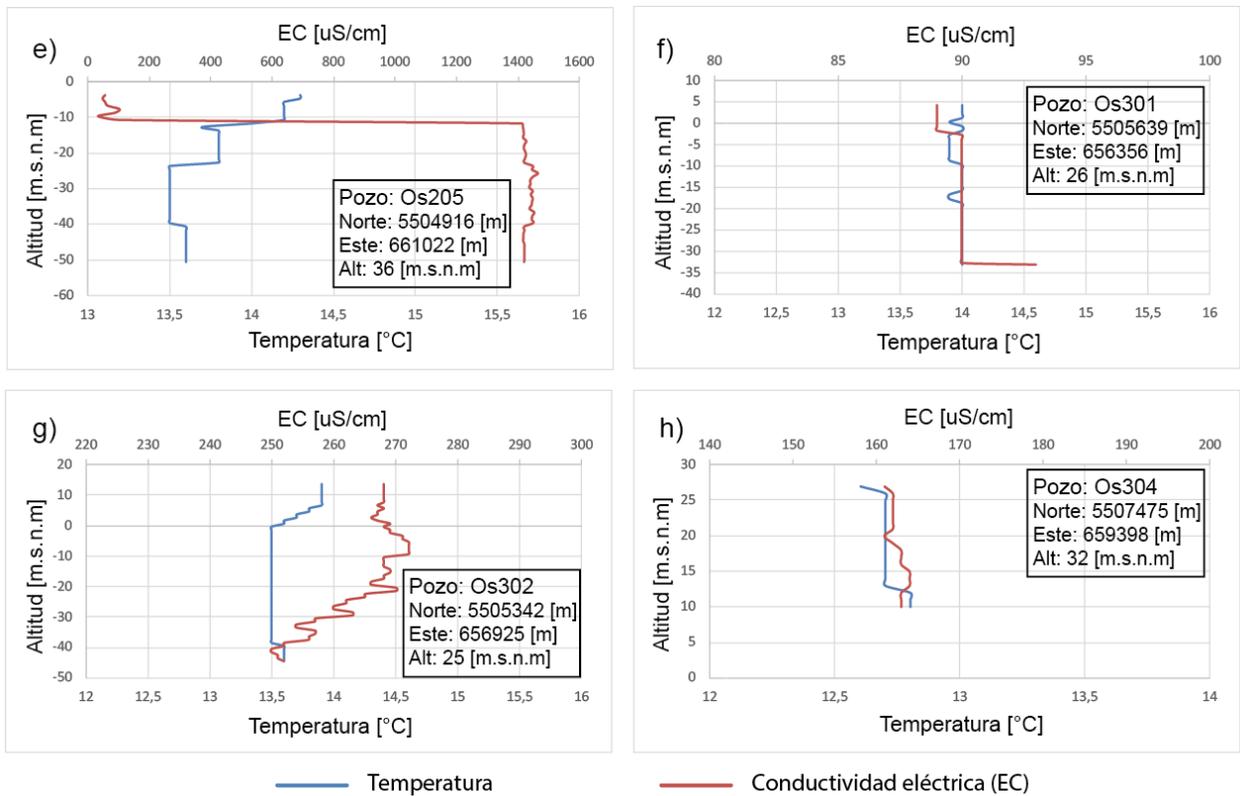


Figura 46: Perfiles de temperatura y conductividad eléctrica de aguas subterráneas medidos en terreno. e) Pozo: Os205. f) Pozo: Os301. g) Pozo: Os302. h) Pozo: Os304.

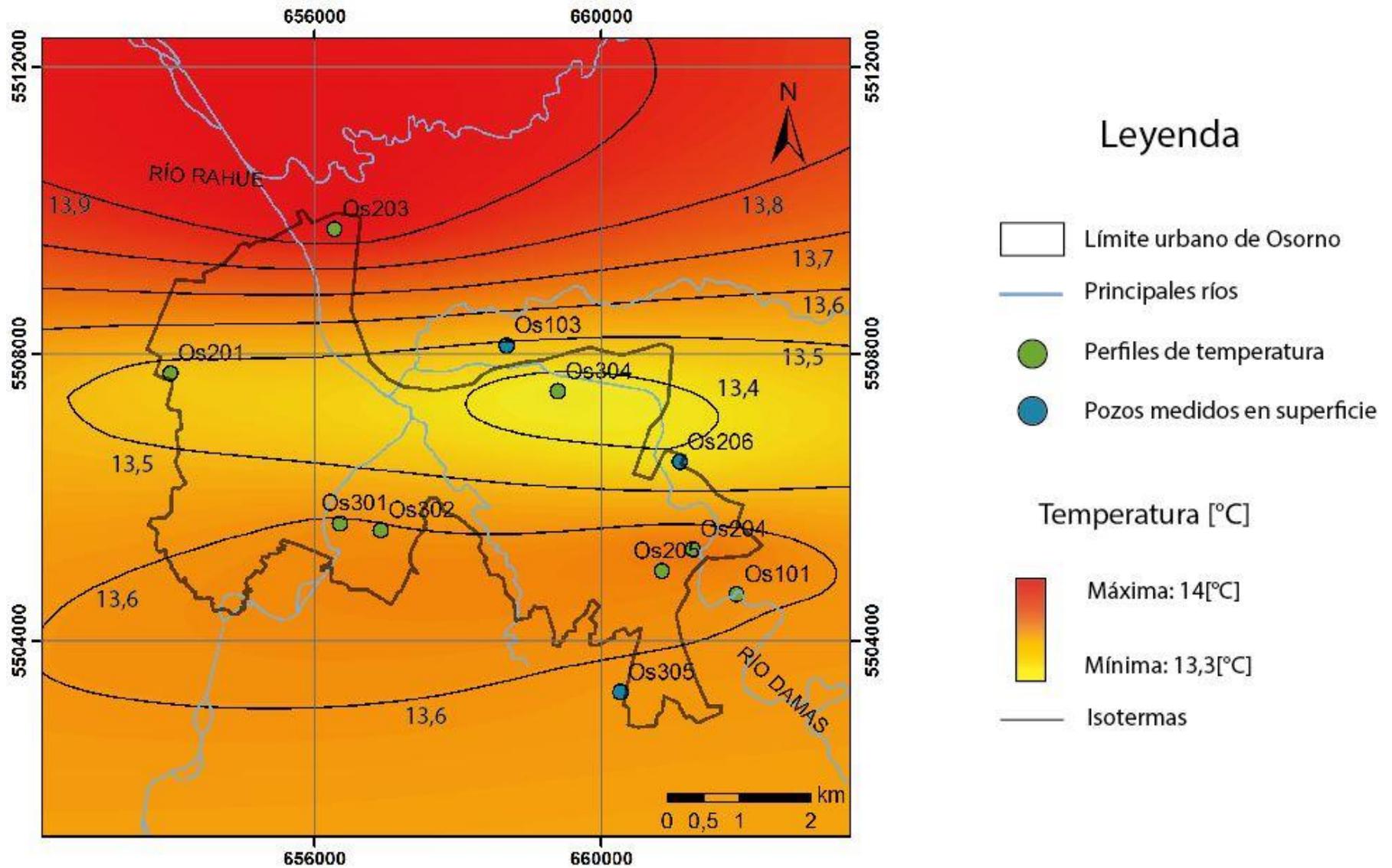


Figura 47: Mapa de distribución de temperaturas de aguas subterráneas en Osorno (1:75.000). Se destacan aquellos pozos en donde se pudo medir el perfil de temperaturas (puntos verdes) y aquellos en que se midió desde la superficie (puntos azules).

4.2 Zonificación de la ciudad de Osorno

Tomando en cuenta el PRC de Osorno previo al 2007 y la Ordenanza local del año 2007, se genera una rezonificación del PRC homologando zonas según los parámetros establecidos en la normativa de cada una. Finalmente, la rezonificación se compone de 8 zonas de interés (tabla 13).

Tabla 13: Rezonificación según el Plan Regulador Comunal (PRC) de Osorno previo al 2007 y la Ordenanza local del 2007. Sistemas de agrupamiento permitidos: continuo (C), pareado (P) y aislado (A). Limitantes superficiales: superficie predial mínima (SPmín) y coeficiente de ocupación de suelo (COs).

Zonas de interés	PRC previo al 2007	Ordenanza local PRC 2007	Agrupamiento			SPmín [m ²]	COs máx.	Área útil mín. [m ²]	Área libre mín. [m ²]
			C	P	A				
C	C1	C1	Si	--	--	300	100	300	0
	C2	C2	Si	Si		250	100	250	0
	C3	C3	Si	Si	Si	200	100	200	0
C4	C4	C4	Si	Si	Si	250	75	187,5	62,5
H1	H1	H1		Si	Si	300	60	180	120
		H1A		Si	Si	300	60	180	120
H2	H2	H2	Si	Si	Si	200	60	120	80
H3	H3	H3	Si	Si	Si	140	80	112	28
E	E1	E1	--	--	--	--	--	--	--
	E2	E2	--	--	Si	400	50	200	200
	E3	E3	--	--	Si	250000	50		250000
	E4	E4	--	--	Si	800	60	480	320
	E5	E5	--	--	Si	37000	50		37000
	E6	IP	--	--	Si	--	--	--	--
		E8	--	--	Si	1000	80	800	200
R	R6	E6	--	--	--	--	--	--	--
	R7	E7	--	--	--	--	--	--	--
	R1	R1	--	--	Si	600	30	180	420
	R2	R2	--	--	Si	600	30	180	420
	R3	R3	--	--	--	--	--	--	--
	R4	R4	--	--	--	--	--	--	--
	R5	R5	--	--	--	--	--	--	--
	R8	R8	--	--	--	--	--	--	--
	R10	R10	--	--	--	--	--	--	--
	R11	R11	--	--	--	--	--	--	--
		R9	--	--	--	--	--	--	--
I	I	I	--	--	Si	800	60	480	320

Las zonas R e I están restringidas en el uso residencial. Por otra parte, la zona E permite sectores de esparcimiento y áreas verdes, mientras que su uso residencial permite sólo viviendas de cuidadores. La zona C representa todo lo que conforma el centro de la ciudad de Osorno, donde se permiten múltiples actividades de diferente índole, además del uso residencial. Las zonas H1, H2 y H3, conforman el sector residencial, cada cual con una normativa diferente para el uso de suelo. La zona C4, es una suerte de híbrido entre la zona C y las zonas residenciales de H1, H2 y H3. En el anexo 3, se recopilan los usos de suelo permitidos en cada zona.

La tabla 13 contiene valores definidos en la ordenanza local del 2007 para superficie predial mínima (SP_{mín}) y coeficiente de ocupación máximo del suelo (COs). Mediante la ecuación 29, se determina la superficie mínima útil (tabla 13) para la construcción de viviendas, mientras que el área restante se define como la superficie libre mínima. La re zonificación presenta 6 zonas de interés para el uso residencial y dos de restricción (figura 48).

$$\text{Superficie útil [m}^2\text{]} = \text{COs} * \text{SP}_{\text{mín}} [\text{m}^2] \quad (29)$$

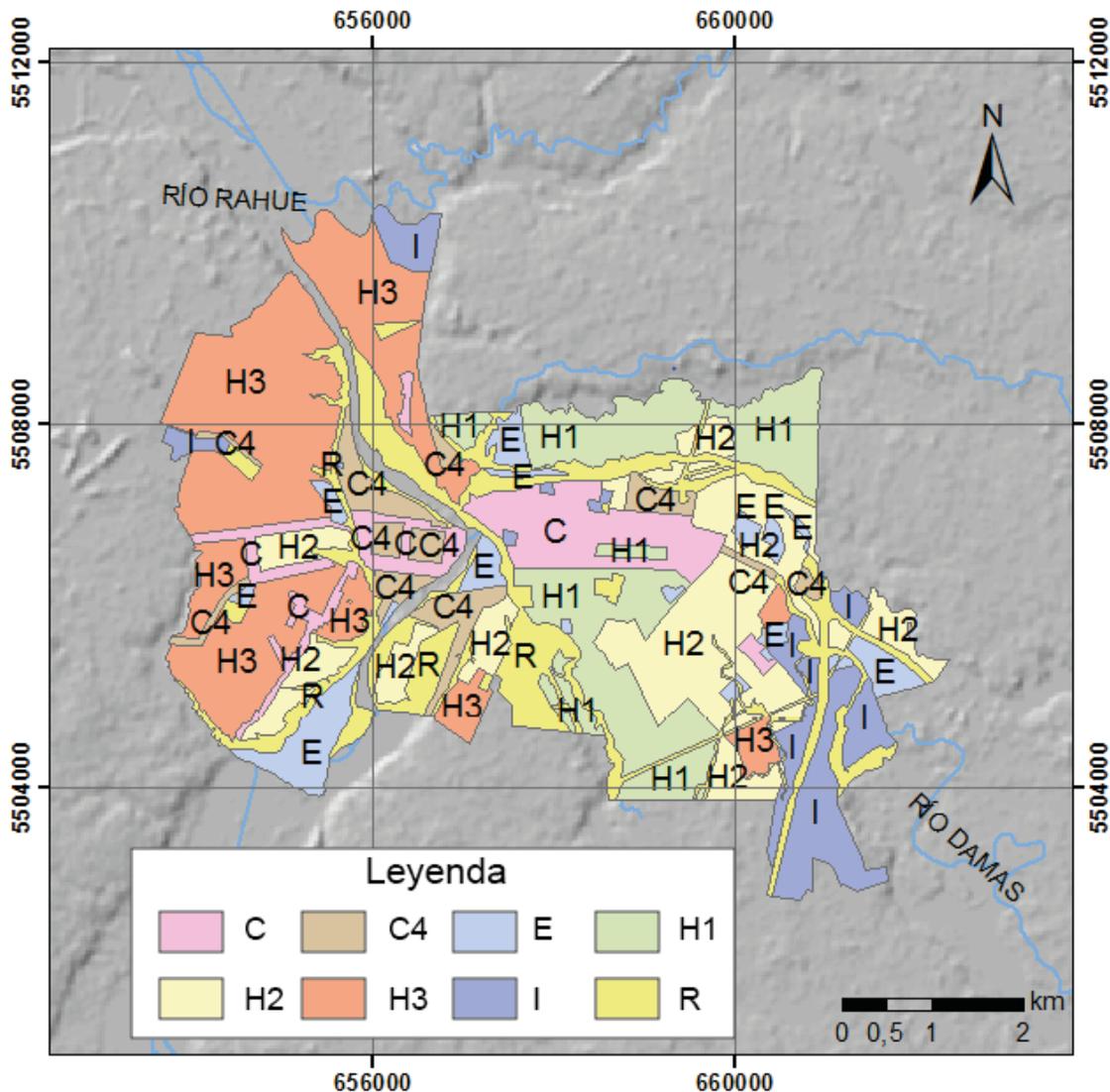


Figura 48: Rezonificación del Plan regulador comunal (PRC) de la ciudad de Osorno según zonas de interés.

4.2.1 Definición de tipologías de vivienda

Como se mencionó anteriormente, el informe de la UNTEC estima la demanda asociada a diferentes tipologías de viviendas. El método se basa en el realizado en RETScreen International (2005) con mejoras que consideran ganancias solares e internas, y la modificación de la temperatura base a 19 [°C]. La tabla 14 expone las tipologías consideradas en este estudio, la información referente a la materialidad de las viviendas se encuentra en el anexo 3.

Tabla 14: Definición de tipologías de viviendas típicas chilenas (UNTEC, 2014). Agrupamientos: continuo(C), pareado (P) y aislado (A).

Tipología	Agrupamiento	Pisos	Superficie útil interior [m ²]
T1	A	1	57
T3	A	2	103
T4	C	2	52
T5	P	1	68
T6	P	2	85
T7	P	1	33

Respecto a la materialidad de las viviendas, hay que mencionar que antes del año 2000 no existía ninguna exigencia térmica para estas. No obstante, en el periodo 2000-2007 y el posterior al 2007, se limita la normativa de las transmitancias energéticas para techumbre y muros, ventanas y pisos, respectivamente. Las tipologías presentadas en la tabla 14 están dimensionadas y materializadas según la normativa previa al año 2000, por lo que hay una diferencia en la demanda térmica de cada periodo.

CREARA (2013) realiza otro estudio contextualizado en Osorno y genera su propia clasificación de viviendas según datos obtenidos en Corporación de Desarrollo tecnológico (CDT) Cámara Chilena de la Construcción (2010). La tabla 15 recopila información para cada tipología según su sistema de agrupación, porcentaje de ocurrencia, estrato socioeconómico, dimensiones y materialidad. El estudio destaca una relación directa entre el nivel socioeconómico y el tamaño de las viviendas. Esta idea será utilizada para correlacionar tipologías de viviendas al Plan Regulador.

Tabla 15: Definición de tipologías de viviendas asociadas a la ciudad de Osorno (CREARA, 2013). Agrupamiento: aislado (A), continuo (C) y pareado (P).

Tipología	Agrupamiento	Pisos	Ocurrencia [%]					Superficie [m ²]
			Total	ABC1	C2	C3	D-E	
G1	A	1	13	2	3	5	4	70
G2	A	2	13	3	5	2	3	90
G3	A	2						90
G4	P	1	30		3	11	16	55
G5	P	2	23		3	5	14	50
G6	P	2						50
G7	C	1	9		0	3	6	50
G8	D	1	12		6	4	2	60

Del mismo estudio se obtiene una relación entre la proporción de viviendas construidas en cada periodo según la exigencia térmica (tabla 16). Se observa que un 88,7% de las viviendas en Osorno fueron construidas antes del 2000 sin restricciones térmicas.

Tabla 16: Porcentaje de tipologías de viviendas en Osorno construidas en diferentes periodos según el informe CREA (2013).

Tipología	<2000	2000 – 2007	>2007
G1	11	2	0,4
G2-G3	10	2	2
G7	8,7	0	0
G4	27	0,9	0,9
G5-G6	21	0,7	0,7
G8	11	0	2
Total	88,7	5,6	6

4.2.2 Correlación de tipologías

El criterio para correlacionar a las tipologías de UNTEC y CREA, corresponde a una comparación entre los siguientes parámetros: sistema de agrupamiento de viviendas, número de pisos y superficie (correspondiente al primer piso en cada caso).

Posteriormente, para correlacionar las tipologías a las zonas de interés de figura 48, se tomarán en cuenta los siguientes criterios:

- El área de la superficie predial mínima normalizada por el coeficiente de ocupación máximo del suelo (superficie útil mínima en la tabla 13), debe ser mayor que la superficie definida en cada tipología.
- El sistema de agrupamiento de la tipología debe estar permitido en el PRC.
- La proporción de tipologías de viviendas de cada zona y la asignación de tipologías según su superficie, serán correlacionadas a los estratos socioeconómicos presentados en la tabla 17.

La segmentación socioeconómica (anexo 4) se realiza bajo el criterio antes mencionado, es decir, una posición socioeconómica mayor permite poseer una vivienda con mayor superficie. Por otro lado, se toma en cuenta la información de mapas que muestran el nivel educacional y económico de la ciudad de Osorno (anexo 4). Finalmente, se realiza un barrido de la ciudad usando *Google Earth* y *Google Maps*, lo que, sumado a la experiencia del terreno realizado en Osorno, permite correlacionar estratos socioeconómicos a cada zona residencial de interés del PRC.

Tabla 17: Correlación entre estratos socioeconómicos y zonas de interés. Definición de estratos socioeconómicos según Asociación Chilena de Empresas de Investigación de Mercado (AIM) (2008).

Estrato socioeconómico	Zonas PRC
ABC1	Clase alta
C2	Clase media alta
C3	Clase media
D	Clase media baja
E	Clase baja

En la tabla 18 se correlacionan las tipologías definidas por UNTEC (2014) y CREARA (2013). Los parámetros de vivienda definidos por la UNTEC se consideran en resultados posteriores. Luego, en la tabla 19, se correlacionan las tipologías UNTEC a las zonas de interés del PRC de Osorno, indicando un porcentaje de ocurrencia para cada tipología según una zona determinada.

Tabla 18: Correlación entre tipologías definidas en la UNTEC (2014) y CREARA (2013).

Tipologías	
UNTEC (2014)	CREARA (2013)
T1	G1
T2	-
T3	G2
T4	G7
T5	G4
T6	G6
T7	G4
T8	G6
T9	-

Tabla 19: Correlación entre zonas de interés del PRC y tipologías de viviendas UNTEC (2014) y porcentaje de ocurrencia en cada zona según el tipo de agrupamiento (aislado (A), pareado (P) y continuo (C)).

Zonas de interés	Tipología permitida UNTEC (2014)			Porcentaje relativo por zona		
	A	P	C	A	P	C
C	-	-	T4	-	-	1
C4	T3	T6	T4	0,29	0,51	0,20
H1	T3	T5	-	0,73	0,27	-
H2	T1	T5	T4	0,26	0,58	0,16
H3	T1	T7	T4	0,15	0,62	0,23
E	T1	-	-	1	-	-

4.2.3 Determinación de la demanda energética.

UNTEC (2014) presenta datos de la potencia superficial promedio y demanda superficial promedio en viviendas en Osorno para cada periodo de restricción térmica (tabla 20). La demanda superficial será ponderada por el área de cada tipología para calcular la demanda [kWh] por tipología para cada periodo (tabla 21).

Tabla 20: Potencias y demandas superficiales promedio de cada periodo de restricción térmica en Osorno. Fuente: UNTEC (2014).

Periodo	Potencia promedio [W/m ²]	Demanda Promedio [kWh/m ²]
<2000	153,6	382,5
2000-2007	80,3	173,8
2007-2016	67,5	138,5
>2016	43,9	76,5
Vivienda reacondicionada	43,2	74,7

Tabla 21: Demanda energética medida en [kWh] asociada a cada tipología por periodo de restricción térmica.

Tipología	Área [m ²]	<2000	2000-2007	2007-2016	>2016	Vivienda reacondicionada
T1	57	21.802,5	9.906,6	7.894,5	4.360,5	4.257,9
T3	103	39.397,5	17.901,4	14.265,5	7.879,5	7.694,1
T4	52	19.890	9.037,6	7.202	3.978	3.884,4
T5	68	26.010	11.818,4	9.418	5.202	5.079,6
T6	85	32.512,5	14.773	11.772,5	6.502,5	6.349,5
T7	33	12.622,5	5.735,4	4.570,5	2.524,5	2.465,1

De acuerdo con el método de grados-horas descrito en RETScreen International (2005), se considera la temperatura ambiente horaria de todo el año 2016 para cuantificar las horas de consumo por efecto de calefacción durante un año. Las condicionantes para realizar esta estimación son: sólo habrá consumo en invierno (desde el mes de abril hasta el mes de septiembre) durante las 19:00 y 07:00 de cada día; además, sólo se consumirá cuando la temperatura ambiente sea inferior a los 19°C, temperatura base establecida por UNTEC (2014). El resultado de esta estimación arroja un total de 2562 horas de consumo energético al año.

La potencia de la demanda [kW] se estima para cada tipología según el periodo de restricción térmica (tabla 22). También se obtiene una potencia ponderada por el porcentaje de ocurrencia de tipologías de vivienda según el periodo de restricción térmica (tabla 19). Por otra parte, se propone trabajar con un 60% de la demanda térmica porque Skarphagen (2006) propone que una bomba de calor que genera una energía equivalente al 60% de la potencia total demandada, es capaz de suplir el 100% de las necesidades. Además, se minimizan los costos y el tamaño del sistema de la bomba de calor (tabla 22).

Tabla 22: Potencia demandada según tipología de vivienda y periodo normativo para 2562 horas/año.

Tipología	<2000	2000 al 2007	2007 al 2016	>2016	Potencia Ponderada [kW]	60%potencia ponderada [kW]
T1	8,5	3,9	3,1	1,7	7,9	4,7
T3	15,4	7	5,6	3,1	14,2	8,5
T4	7,8	3,5	2,8	1,6	7,2	4,3
T5	10,2	4,6	3,7	2,0	9,4	5,6
T6	12,7	5,8	4,6	2,5	11,7	7,0
T7	4,9	2,2	1,8	1	4,6	2,7

Con el resultado anterior, se calculan valores de potencia demandada [kW] en cada zona interés del PRC redefinido (tabla 23), ponderando la ocurrencia de tipologías en cada zona según la tabla 19. En la figura 49 se presenta un mapa de la distribución de la potencia demanda en cada zona del PRC redefinido de Osorno. Hay que notar que las zonas de restricción no han sido consideradas en la evaluación porque su uso de suelo no permite el uso residencial.

Tabla 23: Potencia de la demanda ponderada en cada zona de interés.

Zonas de interés definidas	Potencia demandada [kW]	60% Potencia demandada [kW]
C	7,2	4,3
C4	11,5	6,9
H1	12,9	7,7
H2	8,6	5,2
H3	5,7	3,4
E	7,9	4,7

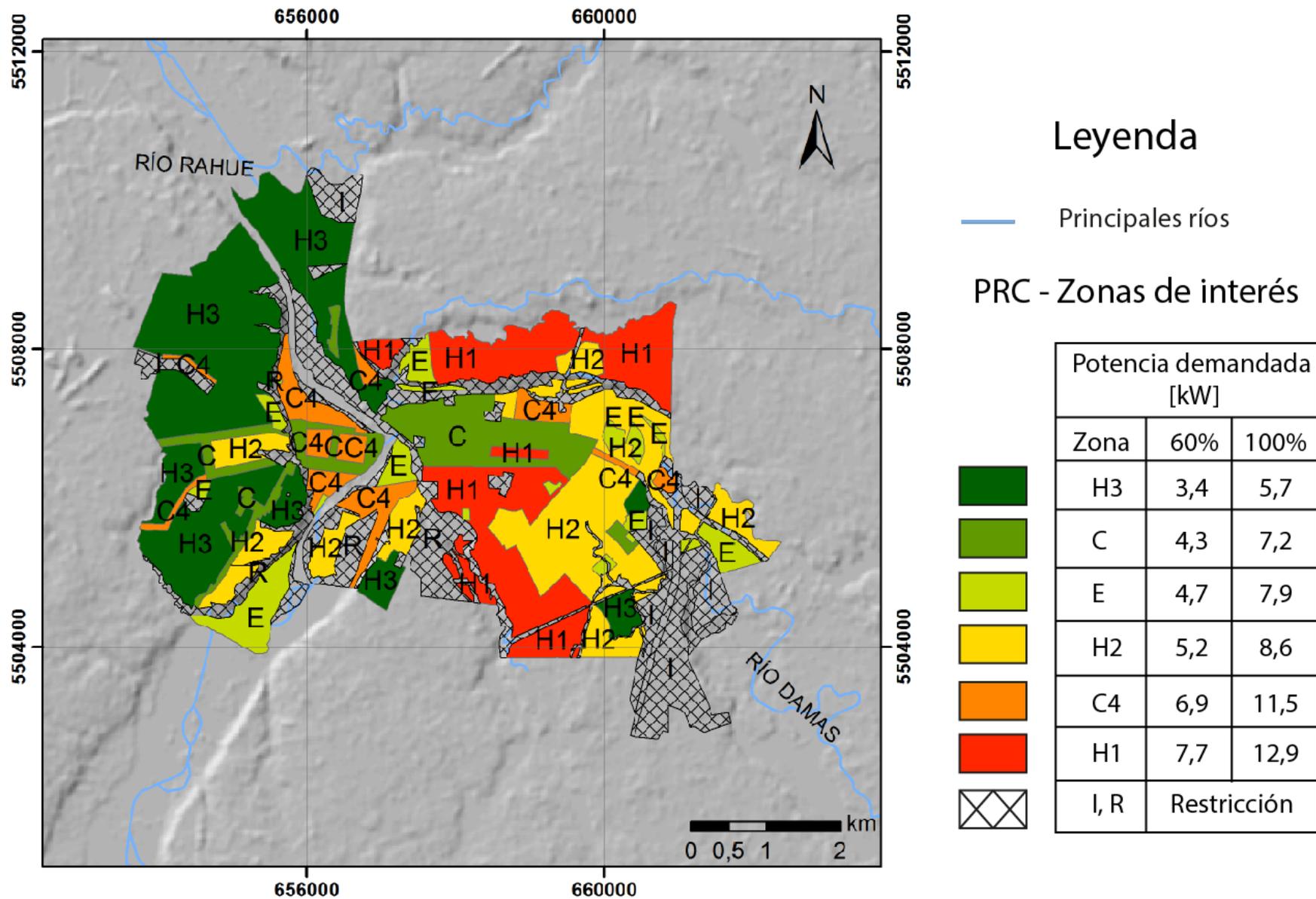


Figura 49: Zonificación de la potencia de la demanda ponderada a partir de las zonas de interés definidas en el PRC de Osorno (1:75.000).

4.3 Sistemas horizontales cerrados

4.3.1 Propiedades térmicas del suelo

En el terreno realizado se midieron 24 datos de parámetros termales del suelo en seis puntos diferentes de la ciudad (tabla 25). El promedio de difusividad térmica es de 0,02 [m²/d] y se utilizará para determinar la temperatura del suelo mediante la ecuación 16.

Para modelar el comportamiento de la temperatura del suelo durante un año hay que considerar ciertos parámetros (tabla 24). Además, se realizará un ajuste para tres profundidades: 0,8 [m], 1,5 [m] y 3 [m], respectivamente (figura 50). Cabe mencionar que la fase utilizada corresponde a 35 días y es transformada a radianes considerando la relación: 366 días = 2π [rad], equivalente a una simplificación de órbita terrestre completa descrita en un año. Los diferentes datos de temperaturas se encuentran registrados en el anexo 6.

Tabla 24: Parámetros usados para modelar la temperatura del subsuelo: Temperatura mensual (T_m), amplitud o semidiferencia entre temperatura máxima y mínima (A_s), frecuencia angular (w), fase y difusividad termal (α).

Parámetros de ecuación		
T_m	11,66	[°C]
A_s	9,51	[°C]
W	0,02	[rad/día]
fase	3,74	[rad]
A	0,02	[m ² /día]

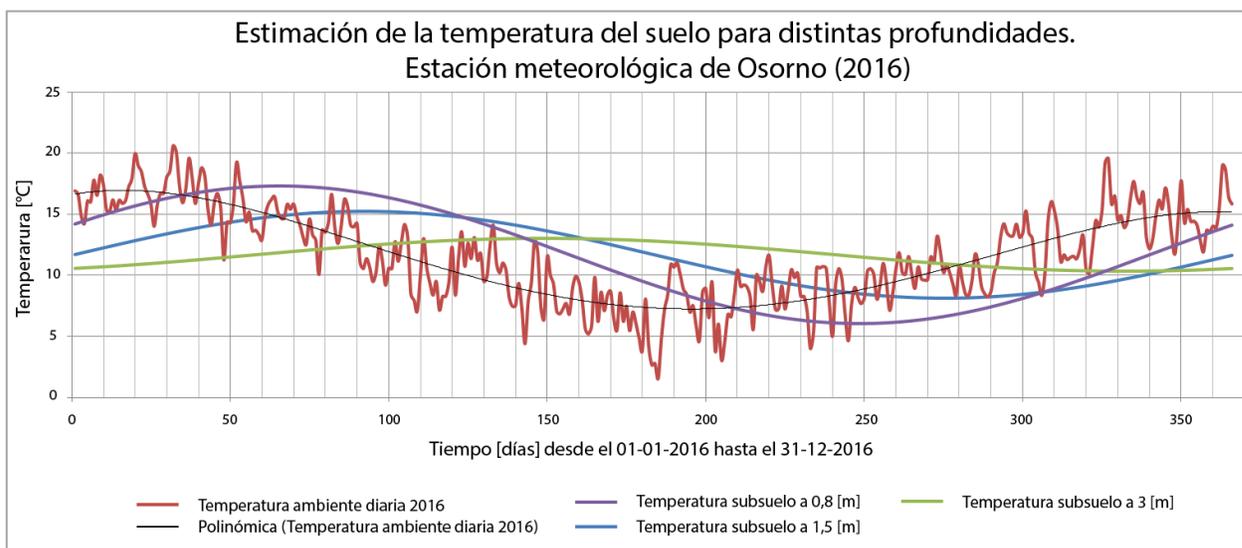


Figura 50: Estimación de la temperatura del subsuelo a diferentes profundidades y temperatura ambiente diaria del año 2016.

Tabla 25: Detalle de las mediciones de parámetros térmicos de suelo realizadas en terreno.

Punto	UTM norte [m]	UTM este [m]	Conductividad térmica [W/mK]	Calor específico [MJ/m ³ K]	Difusividad [mm ² /s]	Resistividad [cm°C/W]	T [°C]
Os202	5507386	655335	0,8	3,4	0,2	129,1	10,3
Os202	5507386	655335	0,6	—	—	171,3	10,2
Os202	5507386	655335	0,7	3,3	0,2	139,3	10,2
Oa202	5507386	655335	0,8	2,9	0,3	126,3	10,2
Os202	5507386	655335	0,8	—	—	126,8	10
Os202	5507386	655335	0,7	3	0,2	148,2	—
Os202	Media		0,7	3,2	0,2	140,2	10,2
Os202	Desviación STD		0,1	0,2	0	17,5	0,1
Os203	5509744	656283	0,9	—	—	118,1	10,1
Os203	5509744	656283	0,6	2,9	0,2	163,8	10,1
Os203	5509744	656283	0,7	2,8	0,3	143	10
Os203	5509744	656283	0,9	2,6	0,3	113,9	11
Os203	Media		0,8	2,7	0,3	134,7	10,3
Os203	Desviación STD		0,1	0,2	0,1	23,3	0,5
Os204	5505243	661070	0,4	2,2	0,2	257,4	9,3
Os204	5505243	661070	0,6	3,7	0,2	181,8	9,5
Os204	5505243	661070	0,5	—	—	205,8	9,4
Os204	5505243	661070	0,3	2,1	0,2	315,4	8,9
Os204	5505243	661070	0,4	2,6	0,2	242,9	9
Os204	Media		0,4	2,6	0,2	240,7	9,2
Os204	Desviación STD		0,1	0,8	0	51,4	0,3
Os301	5505639	656356	0,4	2,4	0,2	281	7,3
Os301	5505639	656356	0,6	—	—	177	8,1
Os301	5505639	656356	0,7	2,8	0,2	148	7,6
Os301	Media		0,5	2,6	0,2	202	7,7
Os301	Desviación STD		0,2	0,2	0,1	69,9	0,5
Os302	5505542	656925	0,9	3	0,3	116,4	7,4
Os302	5505542	656925	1	5,2	0,2	100,1	7,5
Os302	5505542	656925	0,9	—	—	107,50	7,1
Os302	Media		0,9	4,1	0,2	108,00	7,3
Os302	Desviación STD		0,1	1,5	0,1	8,16	0,2
Os303	5507490	659386	0,8	—	—	129,1	7,9
Os303	5507490	659386	0,7	3,4	0,2	139,9	8,3
Os303	5507490	659386	0,6	2,7	0,2	181,9	7,5
Os303	Media		0,7	3,1	0,2	150,3	7,9
Os303	Desviación STD		0,1	0,5	0	27,9	0,4
Media			0,7	3	0,2	162,6	8,8

En la figura 50 se observa una curva ajustada de las temperaturas medias diarias en año 2016. Respecto a la forma de cada curva en función de la profundidad se observa que, a mayor profundidad, la amplitud de la curva es menor y existe un desfase positivo de la curva respecto del ajuste de la temperatura ambiente. Los valores de interés se presentan en la tabla 26.

4.3.2 Determinación del COP

Se realizó el cálculo del COP para los 366 días del año 2016 mediante la ecuación 8. Para esto, se considera la temperatura del subsuelo como la temperatura del punto frío. El resultado se modela para profundidades de 1,5 [m] y 3 [m] (figura 51). Los parámetros de importancia se resumen en la tabla 26.

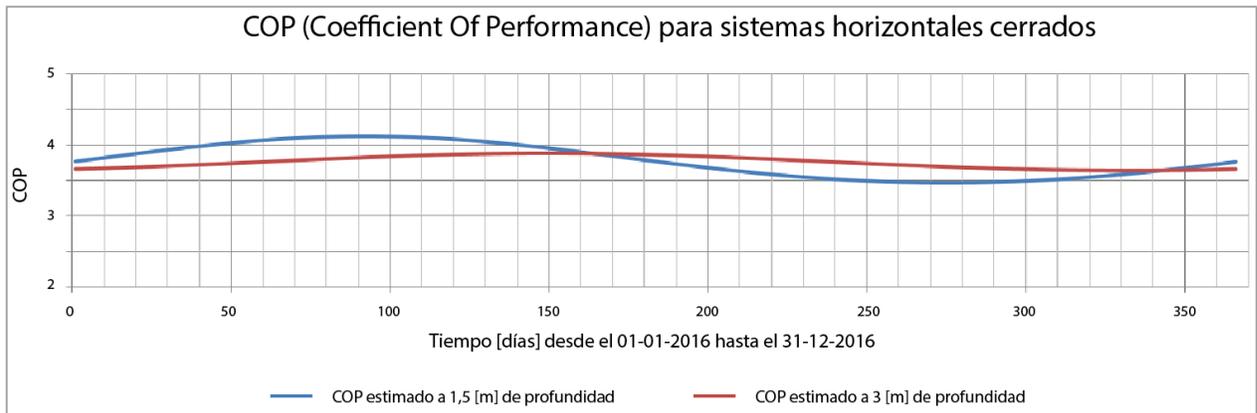


Figura 51: Estimación del coeficiente de rendimiento (COP) para profundidades de emplazamiento de colectores horizontales a 1,5 [m] y 3 [m]; durante el año 2016.

Tabla 26: Valores de COP y temperatura del subsuelo a diferentes profundidades de emplazamiento para colectores horizontales cerrados.

Profundidad del intercambiador [m]	Temperatura [°C]			COP		
	Mínimo	Máximo	Media	Mínimo	Máximo	Medio
1,5	8,1	15,2	11,7	3,5	4,1	3,8
3	10,3	13	11,7	3,6	3,9	3,8

En resumen, se observa que durante el invierno el COP tiende a un valor mínimo conforme progresan los días de la estación, por lo que se considera sólo el COP mínimo para cálculos posteriores.

4.3.3 Determinación del potencial de extracción del suelo

Para determinar la potencia de extracción del suelo se considera la ecuación 9, que tiene como parámetros a la potencia total generada y el COP. El problema será tratado bajo la siguiente premisa: la potencia total generada debe satisfacer a la demanda térmica. Entonces hay que plantear un escenario en que la potencia total es capaz de satisfacer un 100% de la demanda térmica y otro que satisface sólo un 60%. Luego, en cada caso,

se calcula la potencia extraída del suelo según la demanda térmica determinada para cada tipología de vivienda (tabla 27), considerando un COP mínimo y medio para profundidades de 1,5 [m] y 3 [m] respectivamente.

Tabla 27: Potencia extraída del suelo [kW] para satisfacer una demanda térmica total y el 60% de esta para COP estimados a 1,5 [m] y 3 [m].

Tipologías	Demanda térmica			Demanda térmica (60%)		
	COP mín		COP medio	COP mín		COP medio
	1,5 [m]	3 [m]		1,5 [m]	3 [m]	
T1	5,6	5,7	5,7	3,4	3,4	3,4
T3	10,1	10,3	10,4	6,1	6,2	6,2
T4	5,1	5,2	5,2	3,1	3,1	3,2
T5	6,7	6,8	6,9	4	4,1	4,1
T6	8,3	8,5	8,6	5	5,1	5,1
T7	3,2	3,3	3,3	1,9	2	2

4.3.4 Superficie de intercambiadores horizontales

Para calcular la superficie necesaria de extracción del potencial termal del suelo mediante colectores horizontales, se utiliza la ecuación 22. El potencial específico de extracción de calor del suelo (q_E) utilizado es de 20 [W/m²] (tabla 11), considerando un consumo anual aproximado a 2400 horas y un suelo cohesivo a húmedo, según observaciones en terreno. La tabla 28 presenta valores para la superficie estimada que debe abarcar cada intercambiador para satisfacer la demanda térmica en cada tipología de vivienda.

Tabla 28: Superficie libre estimada [m²] para satisfacer la demanda termal total y su 60%, para COP estimados a 1,5 [m] y 3 [m]. Se considera un valor de potencial específico de extracción de calor del suelo de 20 [W/m²].

Tipologías	Demanda térmica			Demanda térmica (60%)		
	COP mínimo		COP medio	COP mín		COP medio
	1,5 [m]	3 [m]		1,5 [m]	3 [m]	
T1	279,8	285,4	287,2	167,8	171,2	172,2
T3	505,5	515,7	518,8	303,2	309,3	311,2
T4	255,2	260,4	262	153,2	156,3	157,3
T5	333,8	340,5	342,6	200,1	204,2	205,4
T6	417	425,4	428	250,3	255,3	256,9
T7	161,8	165	166	97,1	99	99,6

La superficie de los intercambiadores, estimada en la tabla 28, debe ser comparada con la superficie libre de cada tipología UNTEC (2014). Esta última considera como premisa que las superficies de viviendas se configuran para un COs máximo. Para encontrar su valor se establecen las siguientes relaciones: en primer lugar, de la ecuación 29 se obtiene una superficie útil; luego, el área libre se calcula con la relación de la ecuación 30. Finalmente, combinando ambas expresiones se halla la superficie disponible para la instalación de colectores horizontales (ecuación 31).

$$\text{Superficie libre [m}^2\text{]} = (1 - CO_s) * \text{Superficie predial mínima [m}^2\text{]} \quad (30)$$

$$\text{Superficie libre [m}^2\text{]} = \text{Superficie útil [m}^2\text{]} * \left(\frac{1 - CO_s}{CO_s}\right) \quad (31)$$

En la tabla 29 se presentan resultados sobre la superficie disponible en [m²] para cada tipología de vivienda UNTEC (2014), bajo un COs máximo, de acuerdo con la normativa permitida en cada zona de interés.

Tabla 29: Superficie libre [m²] permitida para la instalación de colectores horizontales cerrados en cada tipología de vivienda considerando un coeficiente de ocupación del suelo máximo en cada zona del PRC de Osorno.

Tipologías	Zonas de interés					
	C	C4	H1	H2	H3	E
T1	0	19,0	38,0	38,0	14,3	57,0
T3	0	34,3	68,7	68,7	25,8	103,0
T4	0	17,3	34,7	34,7	13,0	52,0
T5	0	22,7	45,3	45,3	17,0	68,0
T6	0	28,3	56,7	56,7	21,3	85,0
T7	0	11,0	22,0	22,0	8,3	33,0

En la figura 52 se comparan los resultados obtenidos entre superficies estimadas (tabla 28) y superficies permitidas en cada zona del PRC (tabla 29), suponiendo un COs máximo. No se observan casos favorables porque la superficie estimada necesaria es siempre mayor que la superficie libre permitida en cada tipología de vivienda dada la normativa de una zona de interés.

Por otra parte, la superficie útil definida por la UNTEC (2014) se puede comparar con la superficie predial mínima como una variable crítica, asumiendo que todas las viviendas están regularizadas por la normativa vigente de cada zona de interés. Entonces, si la suma entre la superficie útil (tabla 14) y la superficie libre necesaria para satisfacer una potencia equivalente al 60% de la demanda térmica (tabla 28) no logra superar la SPmín de cada zona de interés (ecuación 32), se conoce qué casos es factible instalar estos sistemas. Los resultados se encuentran en la tabla 30, donde los casos favorables son indicados por un “Si”. Cabe a lugar mencionar que en la zona C, los casos favorables ocurren bajo la superficie predial mínima normadas en las subzonas C1 y C2, no así en C3.

$$SP_{mín} [m^2] > \text{Superficie útil [m}^2\text{]} + \text{Superficie libre [m}^2\text{]} \quad (32)$$

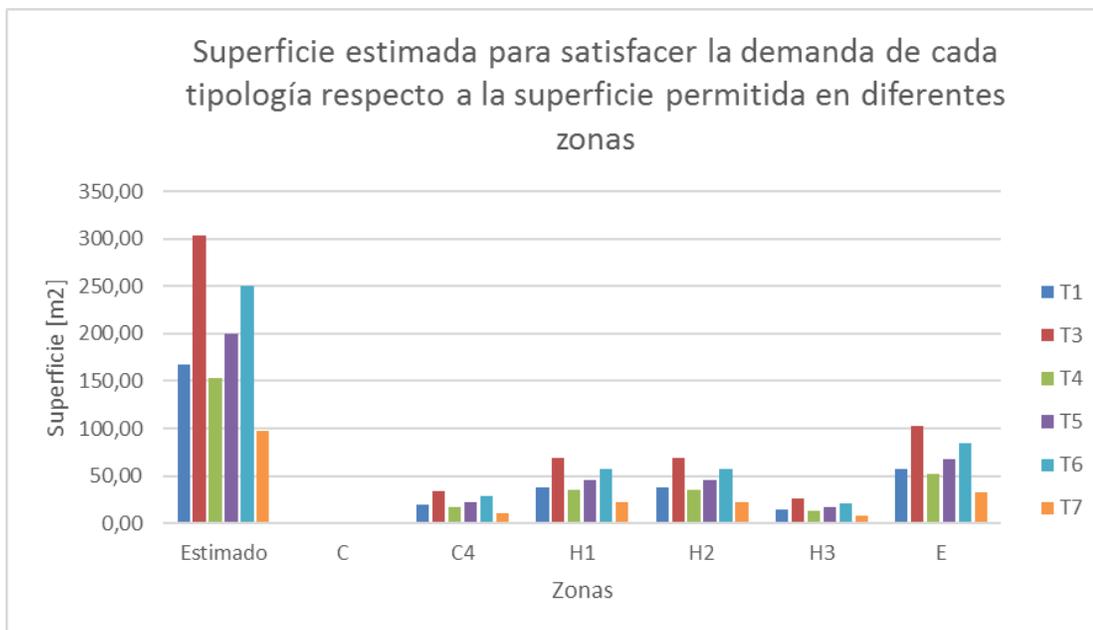


Figura 52: Comparación entre la superficie estimada para instalar colectores horizontales cerrados que logren satisfacer un 60% demanda térmica total en cada tipología de viviendas y la superficie libre permitida para cada tipología según la normativa de cada zona de interés bajo un criterio de ocupación del suelo máximo.

Tabla 30: Tipologías de vivienda que poseen una superficie total mayor que la superficie predial mínima en cada zona del PRC. Aquellas celdas indicadas por un “Si” corresponden a los casos favorables.

Tipología	Superficie total	Zona C (C1 y C2)	Zona C4	Zona H1	Zona H2	Zona H3	Zona E
T1	224,8	-	-	-	No	No	Si
T3	406,2	-	No	No	-	-	-
T4	205,2	Si	Si	-	No	No	-
T5	268,1	-	-	Si	No	-	-
T6	335,3	-	No	-	-	-	-
T7	130,0	-	-	-	-	Si	-

4.4 Sistemas verticales abiertos

4.4.1 Determinación del COP

Para determinar el COP se utilizan los resultados de la figura 47, donde se presenta una distribución de temperaturas del agua subterránea, que es la fuente de calor para sistemas GWHP. La interpolación de temperaturas se realiza mediante una calculadora de imágenes *raster* del programa *ArcGis*, y con la ecuación 8 se determina el COP. En la ecuación, la temperatura del agua subterránea corresponde a la temperatura del punto frío.

Los valores de COP tienden a ser constante, variando entre 5,84 y 5,98. Esto es congruente con el comportamiento de la temperatura del agua subterránea.

4.4.2 Determinación de caudales y potencias obtenidas.

El caudal que permitirá determinar la potencia generada por una GWHP se obtiene del registro de caudales concedidos en los expedientes de pozos de las pruebas de bombeo. Se genera una frecuencia acumulativa inversa de datos para determinar, mediante percentiles, qué parte de la muestra de la población posee cierto caudal. En la figura 53 se presenta la curva de percentiles para caudales acumulados.

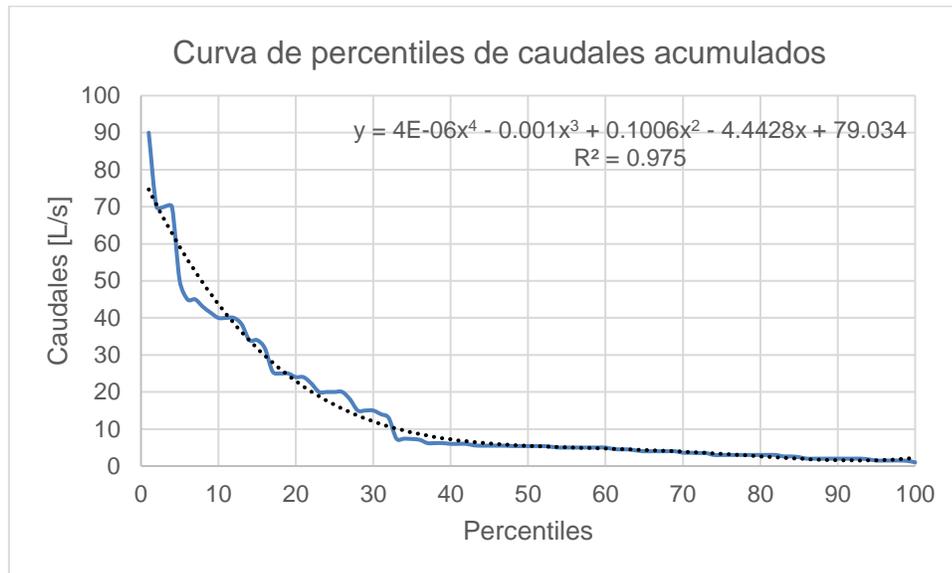


Figura 53: Curva ajustada de percentiles de caudales otorgados mediante derechos de agua por la DGA.

Del gráfico se consideran caudales para el percentil 50, 75 y 90 (tabla 31 y 32). Cabe destacar que el percentil 90 de la población posee caudales de al menos 2 [L/s].

4.4.3 Determinación de la potencia de extracción de calor del suelo y la potencia generada por una GWHP.

La potencia de extracción del agua subterránea se calcula con la ecuación 23. Esta se estima para tres percentiles de la población de caudales y también, considerando diferencias de temperatura entre 3 [K] y 5 [K] (tabla 31 y 32).

Para una diferencia de temperaturas de 5 [K], la potencia de extracción de calor del agua subterránea varía entre 41,8 [kW] y 112,8 [kW]; mientras que, para temperaturas de 3 [K], los valores se encuentran entre los 25,1 [kW] y 67,7 [kW].

Para calcular la potencia total generada por un sistema vertical abierto, se utiliza la ecuación 9. Se realizará una estimación para el COP máximo y mínimo según datos obtenidos para la potencia de extracción del agua subterránea (tabla 31 y 32). En el mejor de los casos se genera una potencia de 136,1 [kW] cuando la temperatura y el caudal son mayores, y el COP es mínimo.

Tabla 31: Percentiles de la población de caudales. Cálculo de la potencia de extracción de calor en agua subterránea para diferencias de temperaturas de 5 [K] y potencia generada por una bomba de calor en sistemas verticales abiertos (GWHP) para COP máximo y mínimo.

Percentil	Caudales [L/s]	Potencia agua subterránea [kW]	Potencia GWHP [kW]	
		$\Delta T = 5$ [K]	COP máx	COP mín
50	5,4	112,8	135,5	136,1
75	3	62,7	75,3	75,6
90	2	41,8	50,2	50,4

Tabla 32: Percentiles de la población de caudales. Cálculo de la potencia de extracción de calor en agua subterránea para diferencias de temperaturas de 3 [K] y potencia generada por una bomba de calor en sistemas verticales abiertos (GWHP) para COP máximo y mínimo.

Percentil	Caudales [L/s]	Potencia agua subterránea [kW]	Potencia GWHP [kW]	
		$\Delta T = 3$ [K]	COP máx	COP mín
50	5,4	67,7	81,3	81,7
75	3	37,6	45,2	45,4
90	2	25,1	30,1	30,3

4.4.4 Profundidad de perforación.

Una de las mayores limitantes de una GWHP es la profundidad de perforación para asegurar la disponibilidad del recurso. Además, los elevados costos ligados a la perforación de pozos. Para conocer la profundidad mínima que se debe perforar se usa la ecuación 24, considerando dos pozos: uno de extracción y otro de reinyección.

En la figura 54 se observa que la profundidad máxima a perforar, según el modelo, es de 106,9 [m]. Las perforaciones más profundas se hallan hacia el oeste de Osorno.

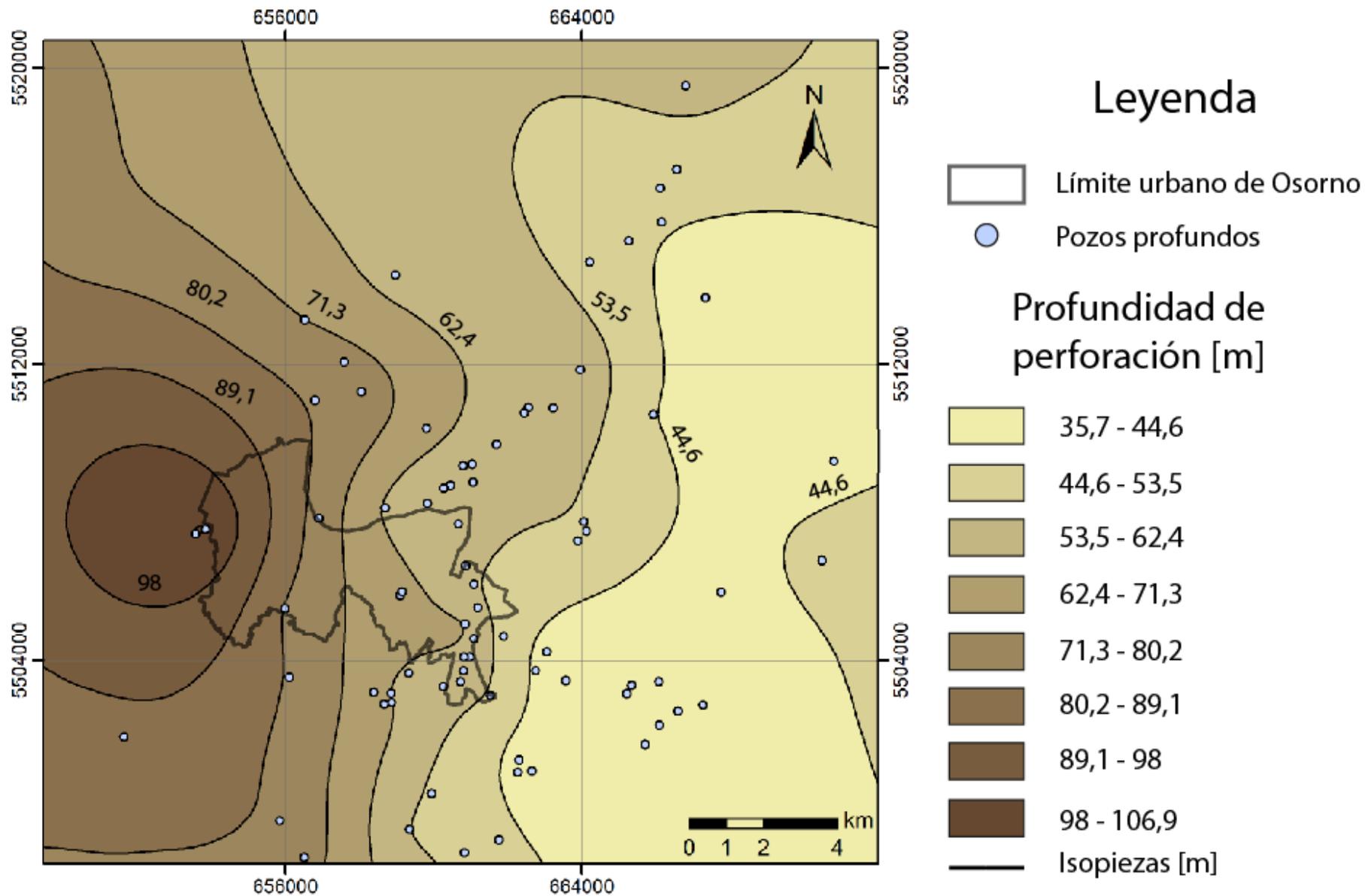


Figura 54: Profundidad de perforación [m] estimada en la zona de Osorno para la implementación de intercambiadores verticales abiertos (GWHP) (1:150.000).

4.5 Sistemas verticales cerrados

4.5.1 Determinación del potencial de extracción específico de calor (sHE)

Se recoge información estratigráfica de 76 pozos profundos en expedientes publicados por la DGA.

El sHE/m se calcula con las ecuaciones 26 y 27, dependiendo de la saturación del suelo. Para simplificar el análisis, se distingue únicamente entre suelos de granulometría fina (limos y arcillas) y gruesa (arenas y gravas). También entre unidades saturadas y secas, según la posición relativa del nivel estático y se determina si hay un flujo fuerte de agua afectando a sedimentos gruesos. Entonces, se asocia un sHE/m para cada sedimento basado en los valores expuestos por Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2004) en la tabla 10.

Los resultados de la interpolación del sHE/m promedio se presentan en la figura 55, variando entre 31,4[W/m] y 78.4 [W/m]. Se observa que el potencial de extracción de calor del suelo aumenta hacia el suroeste. En la tabla 33, se estima el potencial de extracción de calor en cada zona de interés.

Tabla 33: Estadística descriptiva de la distribución del potencial de extracción de calor específico sHE [W/m] en cada zona de interés del PRC de Osorno

Zona	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
C	43,7	46,9	44,9	0,6
C4	43,9	48,3	44,7	0,6
H1	37,3	55,9	45,1	1
H2	43,1	53,4	45,5	1,1
H3	41,9	47,2	43,9	0,7
E	42,7	66,1	45,3	2,3

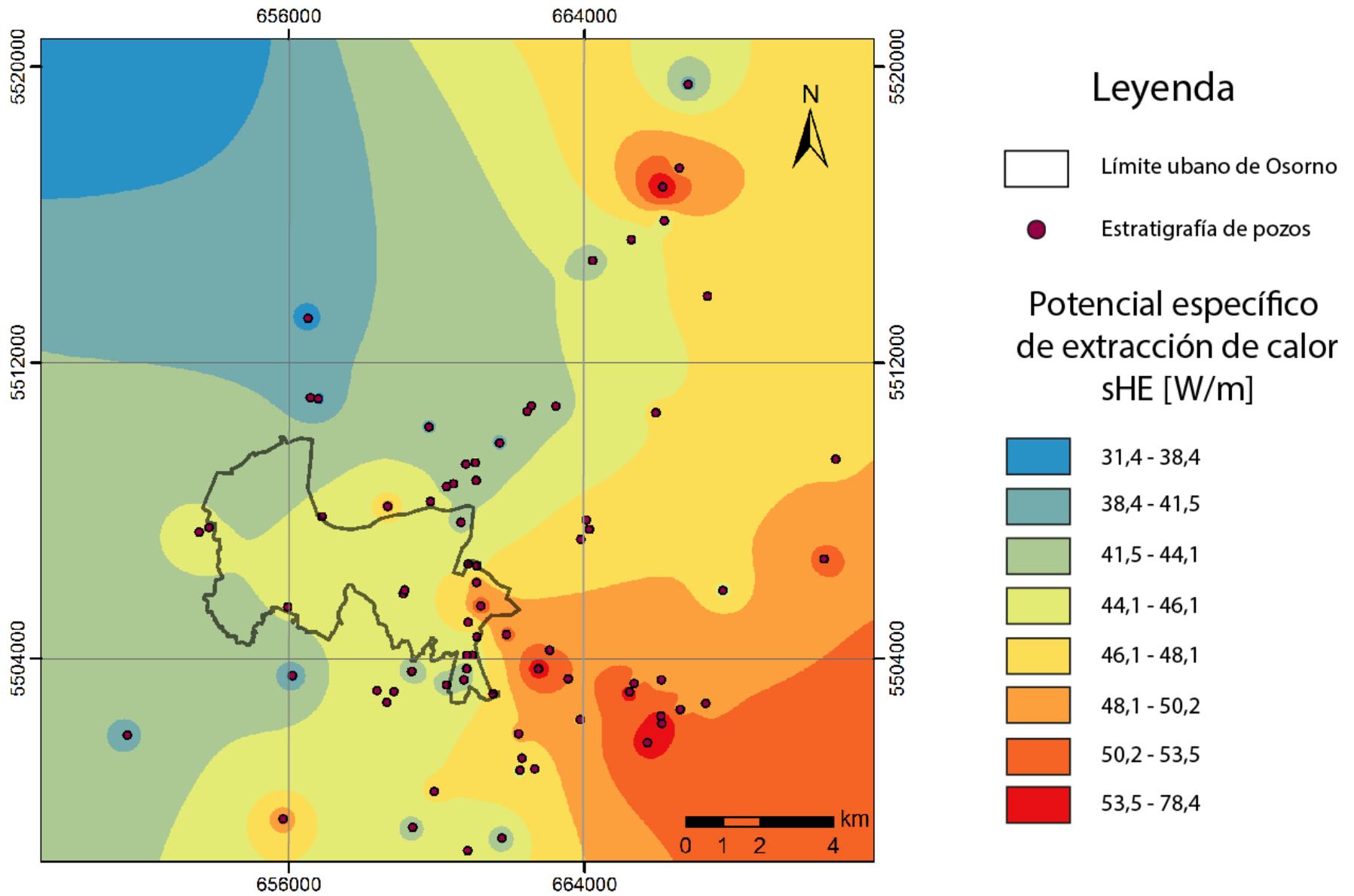


Figura 55: Interpolación del potencial de extracción de calor específico sHE [W/m] (1:150.000)

4.6 Evaluación de bombas de calor en Osorno

4.6.1 Sistemas horizontales cerrados

La información de la tabla 30 se ha resumido en la figura 56. En ella se clasifican las zonas de interés según el criterio de superficie predial mínima (SPmín), diferenciando si este se cumple, parcial o totalmente, en aquellas tipologías permitidas. Hay que notar que la SPmín se compara con la superficie total. Además, las zonas de restricción no permiten el uso residencial del suelo.

Se observa que la zona E es la mejor alternativa para la instalación de GCHP horizontales, ya que existe una superficie suficiente para satisfacer la demanda térmica. Por otra parte, la zona H2 no es propicia para la instalación de estos sistemas, ya que todas las tipologías de vivienda permitidas presentan limitantes espaciales. Sin embargo, en otras zonas sólo algunas tipologías cumplen el criterio de superficie predial mínima.

Respecto a las cotizaciones realizadas para estos sistemas, el costo medio de implementación es de \$19.229.037, sin considerar el costo por excavar ni rellenar la superficie donde se instalaría el sistema.

4.6.2 Sistemas verticales abiertos

En los sistemas GWHP se han clasificado las zonas de interés según la razón entre la demanda térmica y la potencia generada, en cada una (figura 57). Se presentan 3 casos, variando la potencia en función de la temperatura y el caudal. Además, en cada zona se estima el valor asociado a la bomba de calor y a la perforación de 2 pozos: uno de extracción y otro de reinyección.

Este sistema puede satisfacer la demanda térmica en cada zona al menos 4 veces. Se observa que el sistema es más eficiente en la zona H3 porque posee menores demandas, pero también resulta ser la zona con mayor costo de perforación (tabla 34).

La tabla 34 resume la información de la figura 54 (caso 1), referente a la profundidad de perforación necesaria para alcanzar el recurso hídrico en cada zona. Además, considera los costos ligados a la perforación y a una bomba de calor. Por otra parte, considerando que la mayor extracción de agua se realiza en el acuífero intermedio, se calcula el costo de perforar un pozo que alcance el techo de este acuífero (caso 2). Para esto, en la ecuación 28 se reemplaza el nivel estático por la profundidad que se desea perforar.

Cabe a lugar reiterar que las zonas de restricción no se consideran por no permitir el uso residencial del suelo.

Tabla 34: Cuadro comparativo entre la profundidad de perforación para disponer del recurso hídrico y sus costos ligados a perforación de dos niveles y la implementación de una bomba de calor. El primer caso contempla al nivel estático y el segundo al techo del acuífero //A2.

Zona	Caso 1: Profundidad calculada con el nivel estático		Caso 2: Profundidad calculada con el nivel del acuífero //A2.	
	Profundidad [m]	Costos [MM\$]	Profundidad [m]	Costos [MM\$]
C	73,9	57,3	124,8	89,1
C4	77,4	59,5	122,5	87,7
H1	63,7	50,9	112,3	81,3
H2	65,8	52,2	114,8	82,9
H3	89,9	67,3	148,7	104,11
E	72,4	56,3	117,3	84,4

4.6.3 Sistema vertical cerrado

En los sistemas verticales cerrados se estima la profundidad de perforación necesaria para obtener un potencial energético capaz de satisfacer el 60% de la demanda térmica en cada zona de interés (figura 58). Además, consideran los costos asociados a perforación y a la bomba de calor. Lo anterior, se resume en la tabla 36.

Tabla 35: Profundidad [m] de perforación estimada para conseguir una potencia equivalente al 60% de la demanda térmica en cada zona de interés mediante GCHP verticales. Se incluye el costo asociado.

Zona	sHE [W/m]	Potencia (60%) [kW]	Profundidad [m]	Costos [MM\$]
C	44,9	4,3	95,9	71,1
C4	44,7	6,9	154,9	108
H1	45,1	7,7	171,6	118,5
H2	45,5	5,2	113,9	82,3
H3	43,9	3,4	77,5	59,9
E	45,3	4,7	104,2	76,3

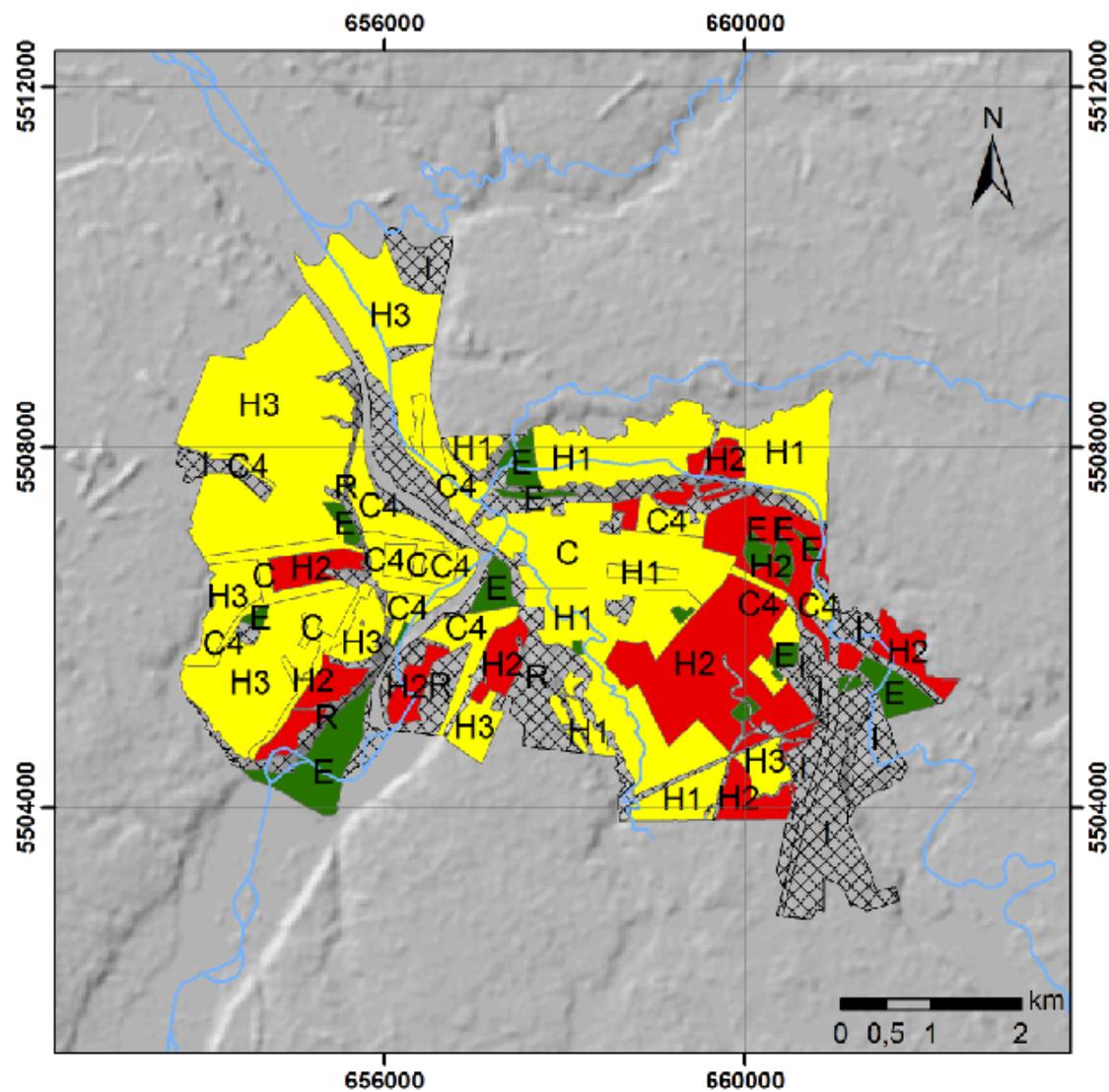


Figura 56: Zonificación de la ciudad de Osorno según el cumplimiento de la norma de superficies prediales mínimas (SPmín) para la implementación de sistemas horizontales cerrados (GCHP) (1:75.000). En la figura, se muestran las zonas de restricción donde el uso residencial de suelo no se permite. Para cada zona se detallan en que tipologías es factible instalar sistemas GCHP horizontales cerrados.

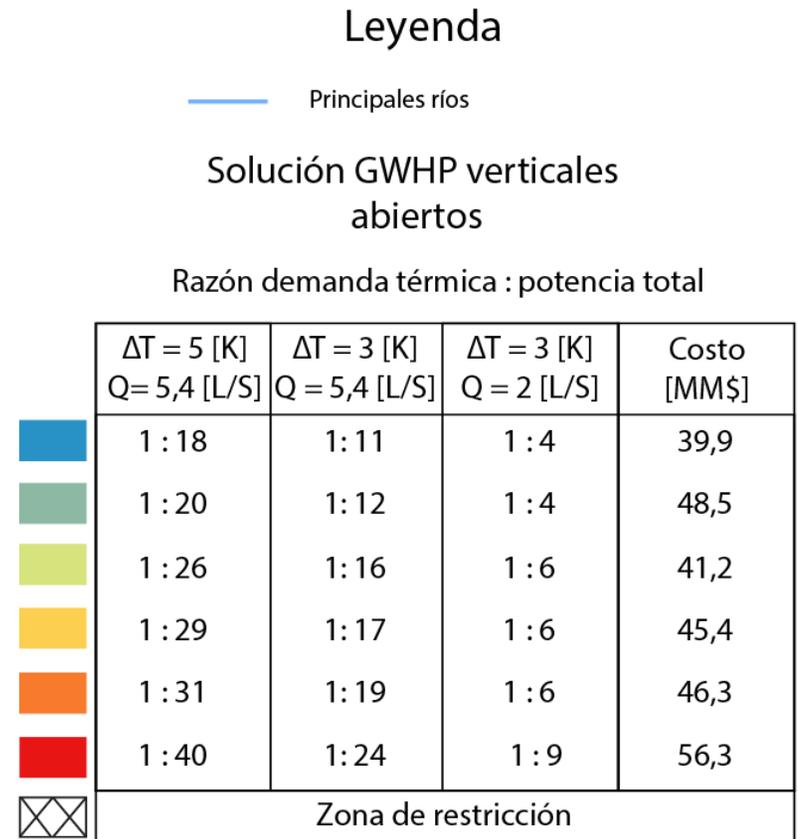
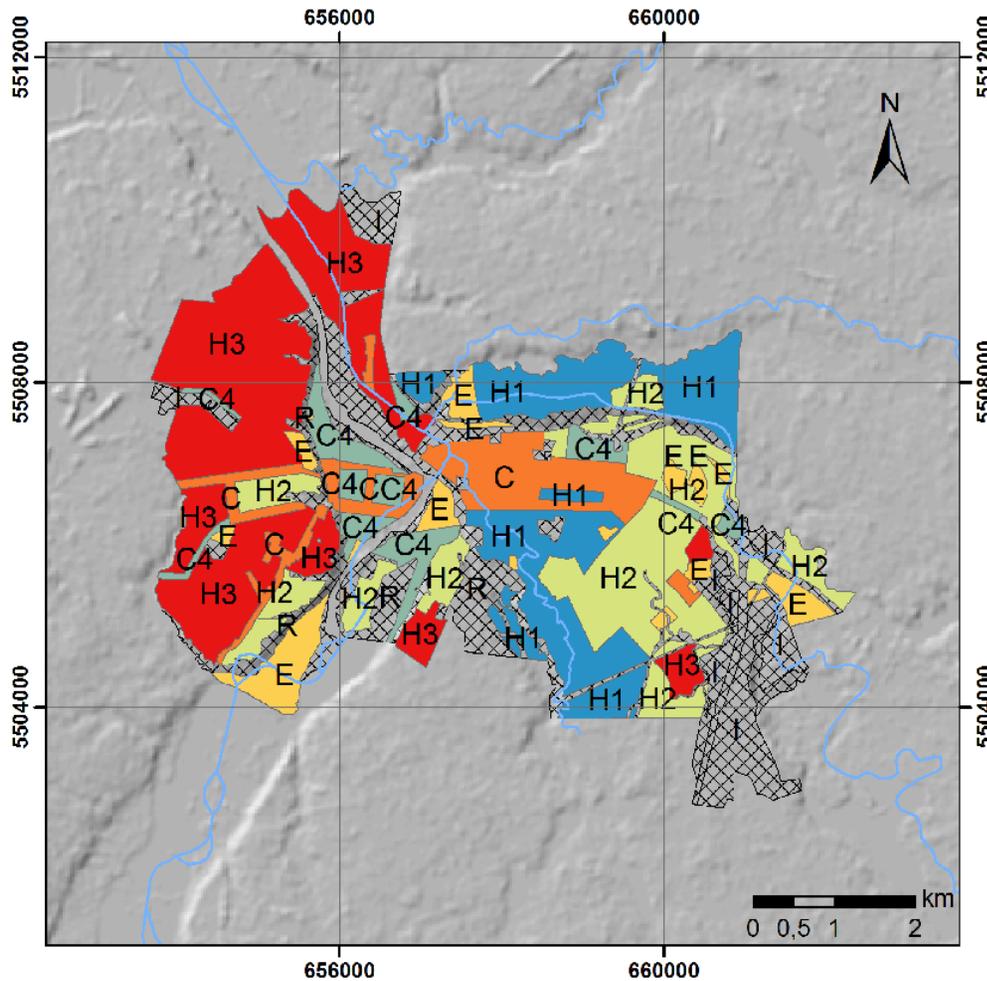


Figura 57: Zonificación de Osorno en función de la razón entre la demanda térmica y la potencia generada en cada zona de interés en sistemas verticales abiertos (GWHP) (1:75.000). Se considera una variación de la potencia generada en función de la diferencia de temperaturas (ΔT) y el caudal (Q). Cada zona posee un costo asociado a la perforación de un pozo de extracción y otro de reinyección, sumado al valor relacionado a la bomba de calor (caso 1).

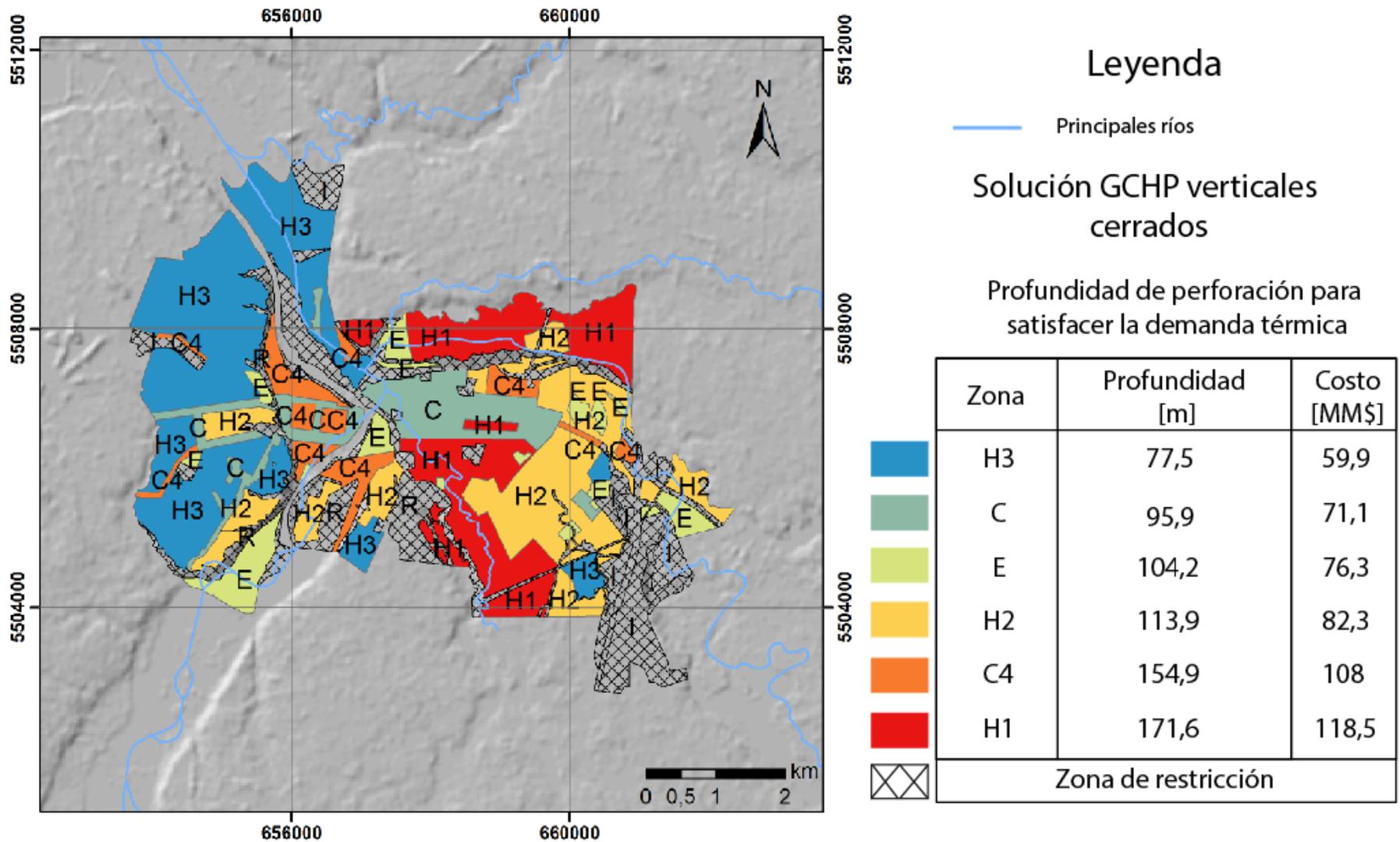


Figura 58: Zonificación de Osorno según la profundidad de perforación necesaria para satisfacer la demanda térmica a partir del potencial específico de extracción de calor (sHE) en sistemas verticales cerrados (GCHP) (1:75.000). Cada zona asociada a un costo por perforación de pozos profundos y obtención de una bomba de calor.

4.7 Herramienta de decisión

Generar una herramienta de decisión que presente una solución eficiente respecto a la aplicación de bombas de calor geotermales en las diferentes zonas de Osorno, consiste en analizar diferentes soluciones.

En primer lugar, se analizan las limitantes espaciales que presentan las diferentes zonas. Los GCHP horizontales cerrados son una solución factible en la zona E, donde el uso residencial del suelo se limita, en general, a viviendas para cuidadores en áreas de esparcimiento. Por otra parte, la zona H2 no permite el uso de GCHP horizontales porque las dimensiones necesarias para satisfacer la demanda podrían superar el tamaño permitido en un predio.

Luego se consideran las limitantes legales, donde se observa que la totalidad de la zona es declarada como área de reserva de caudales. Sin embargo, esto no limita la petición de derechos de agua.

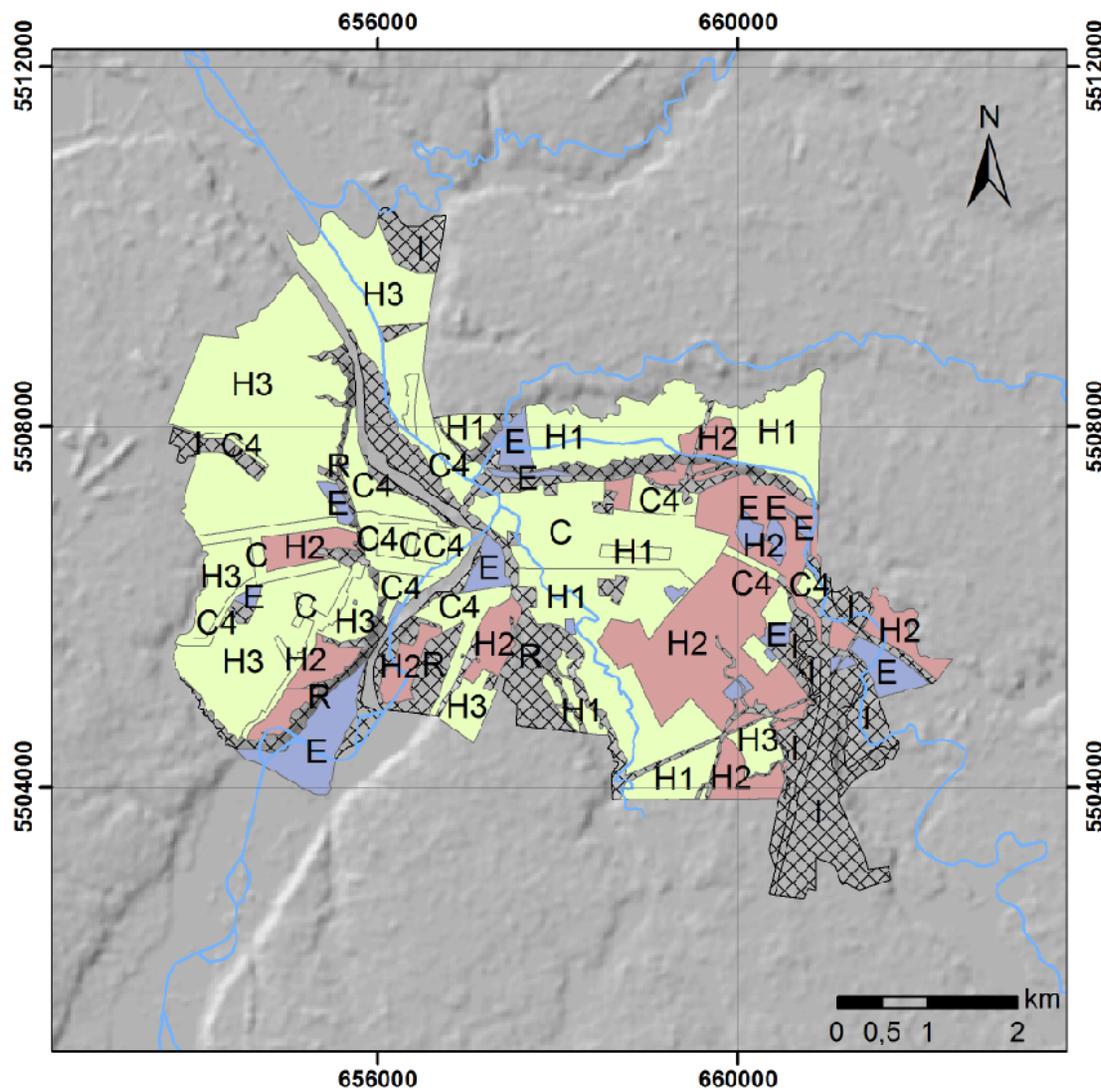
En tercer lugar, se consideran las limitantes económicas que comprenden la inversión que conlleva instalar una bomba de calor acoplada a un sistema de extracción de calor. Los costos ligados a perforación son muy elevados, por ende, siempre es preferible optar por un sistema horizontal cerrado. Luego, la variable económica resulta crítica para establecer cual sistema es el óptimo entre el GWHP y GCHP vertical.

Finalmente, se consigue un mapa como herramienta de decisión que clasifica diferentes zonas de Osorno respecto a la aplicación de bombas de calor geotermales acopladas a intercambiadores de calor para cada tipo de vivienda permitida (figura 59). Lo anterior, considerando variables legales, espaciales y económicas.

La demanda energética de la zona E, puede ser totalmente cubierta por sistemas GCHP horizontales; mientras que en la zona H2, la demanda se puede satisfacer por sistemas GWHP. En otras zonas, dependiendo del tipo de vivienda, la demanda puede ser satisfecha tanto por sistemas GCHP horizontales y GWHP. Los sistemas GCHP verticales resultan altamente costosos, por lo que su aplicación no es recomendada exceptuando aquellos casos en que no sea posible la instalación de otro sistema.

Por otra parte, se evalúa el caso en que los sistemas verticales abiertos poseen perforaciones que pretenden alcanzar el acuífero //A2, en la sección intermedia. Aquí, se observa que los sistemas GCHP verticales compiten como una alternativa factible respecto a los sistemas GWHP, puesto que estos últimos se encarecen (figura 60).

Otra alternativa que se puede evaluar consiste en la construcción de sistemas distritales. Esta idea es desarrollada considerando que los sistemas GWHP pueden generar la suficiente energía calórica para suplir, al menos 4 veces, la demanda térmica. Entonces, este exceso de energía se puede aprovechar para alimentar la demanda térmica en más de un hogar, por ende, la inversión se divide entre las casas beneficiadas por el sistema. Finalmente, esta solución se plantea como la solución más eficiente porque en cualquier zona el costo se reduce en un 75% como mínimo. Sin embargo, las viviendas de la zona E son principalmente viviendas de cuidadores, por ende, se consideran aisladas y no permiten una aplicación distrital (figura 61).



Leyenda

— Principales ríos

■ Solución GCHP horizontal

Zona	Tipología	Costo [MM\$]	Solución
E	T1	19,2	GCHP-h

■ Solución GWHP/GCHP horizontal

Zona	Tipologías	Costo [MM\$]	Solución
H1	T5	19,2	GCHP-h
H1	T3	50,9	GWHP
H3	T7	19,2	GCHP-h
H3	T1-T4	67,3	GWHP
C4	T4	19,2	GCHP-h
C4	T3-T6	59,9	GWHP
C	T4	19,2	GCHP-h
C (C3)	T4	57,3	GWHP

■ Solución GWHP

Zona	Tipologías	Costo [MM\$]	Solución
H2	T1-T4-T5	52,2	GWHP

⊠ Zona de restricción

Figura 59: Herramienta de decisión. Solución para suplir la demanda térmica de viviendas en diferentes zonas de Osorno, aplicando sistemas de bombas de calor geotermiales acopladas a diferentes intercambiadores (1:75.000). Cada zona presenta el costo de implementar aquel sistema que resulta más económico dada una tipología de vivienda.

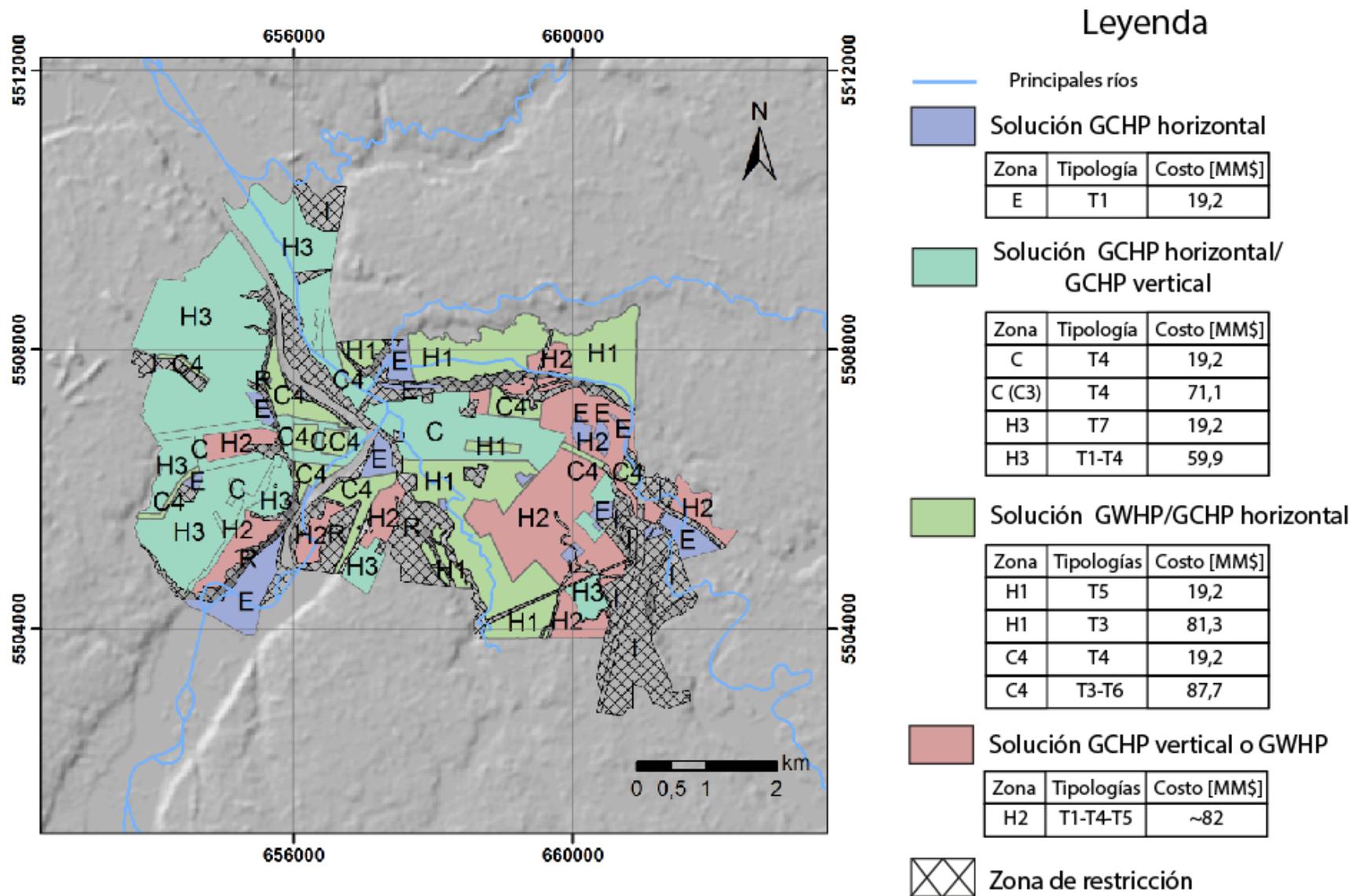


Figura 60: Herramienta de decisión evaluando la opción de perforaciones en sistemas verticales abiertos hasta el acuífero //A2. Solución para demandas térmicas de viviendas en diferentes zonas de Osorno, mediante bombas de calor geotermiales acopladas a diferentes intercambiadores (1:75.000). Cada zona, en la tabla, presenta el costo de implementar aquel sistema que resulta más económico según la tipología de vivienda.

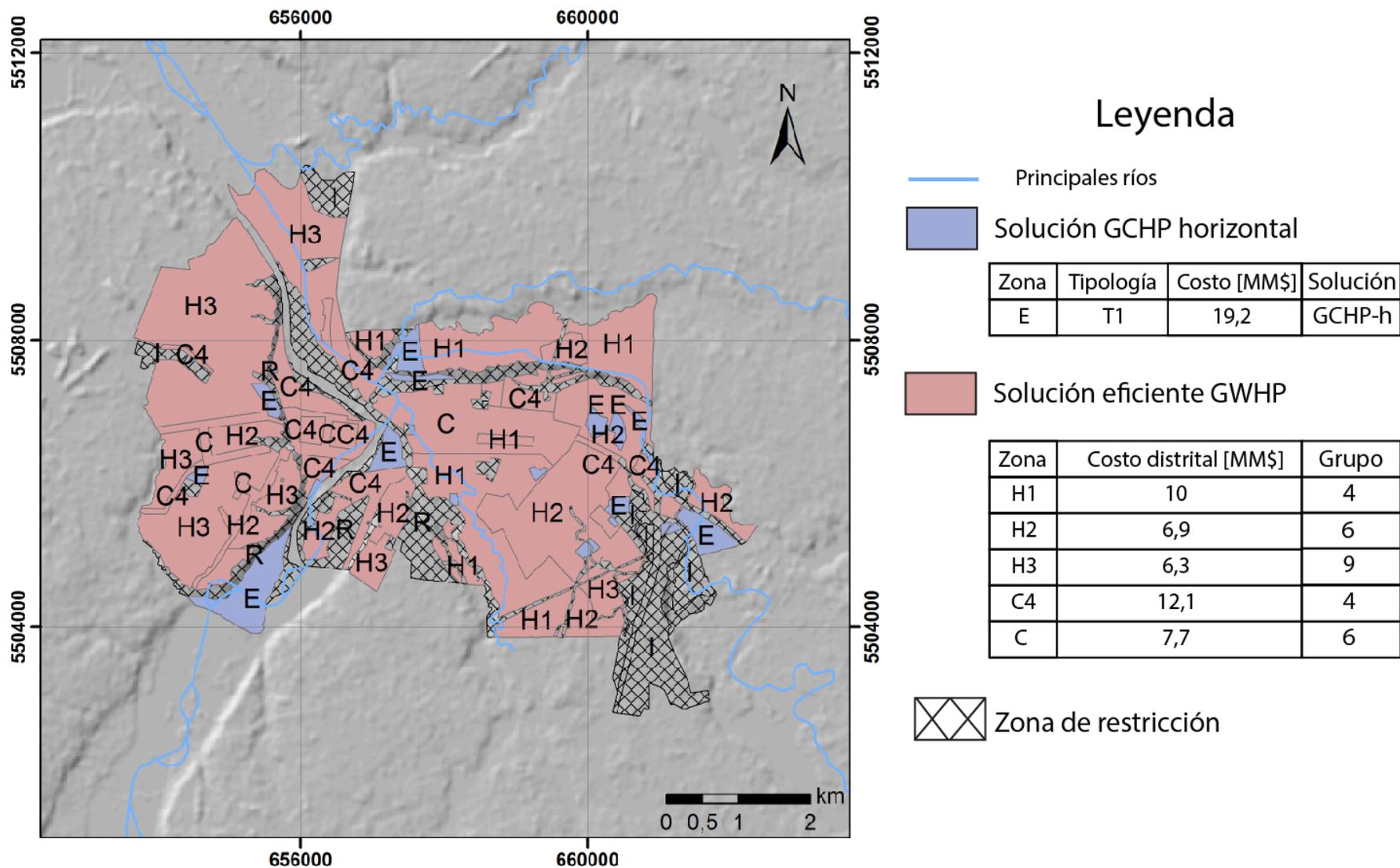


Figura 61: Solución eficiente para suplir la demanda térmica en agrupaciones distritales de viviendas en diferentes zonas de Osorno, mediante la aplicación de bombas de calor geotermales acopladas a intercambiadores (1:75.000). Los sistemas distritales se conforman por grupos de viviendas según la cantidad de veces que la demanda térmica puede ser sustituida por sistemas verticales abiertos (GWHP), en caso contrario se plantean sistemas horizontales cerrados (GCHP).

5 DISCUSIONES

Se genera una base de datos que contiene información recopilada de expedientes de pozos profundos publicados por la Dirección General de Aguas (DGA), con parámetros tales como: ubicación del pozo, caudales concedidos, niveles estáticos y dinámicos, estratigrafía de pozos, profundidad de las cribas y pruebas de bombeo. Esta información se utiliza para analizar la hidrogeología y entender cómo se configuran los acuíferos en la zona. Los datos se obtuvieron en diferentes épocas (entre la década del 80' y el 2017, y en distintos meses del año), lo que puede provocar errores cuando se generan resultados tales como interpolaciones de niveles estáticos o cotas hidráulicas, por ejemplo. Si se considera que un acuífero es una unidad dinámica, entonces estos datos no representarían fielmente sus condiciones en cierto momento ni su evolución temporal. La DGA posee sólo una estación de monitoreo de niveles estáticos y dinámicos en tiempo real, pero se localiza más al norte de la zona de estudio y la información publicada resulta escasa.

Para disminuir errores se hace una reducción de datos, excluyendo aquellos que son distantes a Osorno, anteriores al año 2000 o considerados *outliers* (datos atípicos)⁸. Si se hubiera seleccionado sólo datos posteriores al 2010, la distribución espacial de datos no habría permitido realizar un análisis espacialmente representativo del parámetro estudiado. Del mismo modo, los datos seleccionados corresponden a diferentes estaciones del año, por ende, tampoco se conoce la configuración de las unidades en un momento dado. Se escogió este rango de tiempo para permitir una mejor representatividad espacial en el análisis de los modelos generados.

Por otra parte, la estratigrafía y la ubicación de cribas se correlacionan para generar columnas estratigráficas (anexo 7). Existen pozos que contienen solamente la información estratigráfica o antecedentes técnicos relativos a la construcción de pozos. Para realizar análisis hidrogeológicos se ocupan aquellos pozos que contienen ambos datos, puesto que así se reconoce cuál es la unidad hidrogeológica caracterizada. Uno de los alcances de esta base de datos es que no hay una nomenclatura estándar en la clasificación de sedimentos de los expedientes, tampoco se detallan características como la granulometría o porcentajes relativos del tamaño de sedimentos. Es por esto que la información requiere ser homogenizada en una nomenclatura estandarizada.

Se construyen perfiles esquemáticos, que muestran tres potenciales unidades acuíferas. Una unidad superior parcialmente cubierta por capas de distinta permeabilidad, llegando a ser libre en los valles de los principales ríos. Esta unidad se correlaciona con los acuíferos libres A1 y libre B, definidos en el trabajo de Pérez (2014), en los ríos Rahue y Damas, respectivamente (figura 17). Un segundo acuífero intermedio se ubica a una profundidad cercana al nivel del mar, de espesor variable (hasta 50 [m]) y separado de la unidad superior por un techo con características de acuitardo⁹ y acuícludo (figura 62). Este se relaciona al acuífero confinado //A2 porque presenta características similares a la descripción realizada por Troncoso *et al.* (2008). Un tercer acuífero inferior se encuentra aún más profundo y es de base desconocida, se separa parcialmente del

⁸ En estadística, son datos atípicos, extremos o inusuales, respecto otros valores de una muestra.

⁹ Formación geológica capaz de almacenar grandes volúmenes de agua, pero que transmite con dificultad.

intermedio mediante acuitardos de grano grueso dentro de una matriz fina con geometrías lenticulares, aunque puede conectarse al acuífero intermedio (figura 32 y 33). Según lo descrito por Troncoso *et al.* (2008) y Pérez *et al.* (2014), el acuífero //A2 es una unidad compleja que presenta variaciones de facies y en la geometría de los depósitos (lenticulares a estratiformes). La sección inferior presenta escasez de datos, pero debido a sus características granulométricas y de acuerdo con el contexto geológico en que se formaron estos depósitos, se puede asociar a un miembro inferior del acuífero //A2.

Hay que destacar que la mayor concentración de cribas instaladas en pozos profundos se ubica en el acuífero intermedio o //A2. De esta forma la distribución hidrogeológica puede ser resumida en las secciones B y D de la figura 62.

Respecto a la disposición de las unidades, en los perfiles esquemáticos se observa una tendencia a profundizarse hacia el oeste, lo que es congruente con el perfil gravimétrico de la figura 13, donde se observa que los depósitos de cuenca se profundizan hacia el oeste. Por otra parte, del perfil gravimétrico se desprende que los depósitos no consolidados presentan un espesor de cercano a 500 [m] de profundidad, por lo que se podría hallar otros acuíferos más profundos que los registrados por los pozos. Bajo estos 500 [m] de depósitos no consolidados, se encuentran formaciones de hasta 1 [km] de profundidad y, finalmente, por debajo de estas formaciones aparece el basamento cristalino. La complejidad del registro geológico es producto de diferentes fenómenos geológicos acontecidos en la evolución de la zona de estudio.

Los niveles estáticos obtenidos en las figuras 36 y 37, en general, muestran una tendencia a la profundización del nivel hacia el noroeste de Osorno, lo que es congruente con la geografía de la zona. El análisis de interpolación mediante *kriging*, tanto para niveles estáticos como cotas hidráulicas, se hizo en dos partes: una agrupando datos del acuífero libre A1 y B, y una segunda, considerando sólo al acuífero //A2. Se observa que los niveles estáticos en los acuíferos libres son menos profundos, esto es consistente con un relieve erosionado a causa de la actividad de ríos.

A partir de los niveles estáticos y del relieve, se generan cotas hidráulicas (figuras 38 y 39). En el mapa, se observa que el flujo de agua en el acuífero //A2 tiende hacia el noroeste donde el nivel es más profundo. Hay que notar que al igual que en los niveles estáticos, las cotas hidráulicas de los acuíferos libres se encuentran más profundas, pero también aparece una zona ubicada en la confluencia de ríos que presenta un flujo de aguas algo caótico. Esto puede ser producto de errores en la interpolación causados por los alcances mencionados respecto a la base de datos. Con esta información, se plantea que la recarga de los acuíferos proviene de precipitaciones, el acuífero definido como “confinado” por Pérez *et al.* (2014) se encuentra limitado localmente por acuitardos, posibilitando la infiltración de agua desde la superficie. Además, según el flujo de agua subterránea, la descarga de los acuíferos en la zona ocurre hacia el oeste por el valle del río Rahue y por el norte hacia la cuenca del río Bueno.

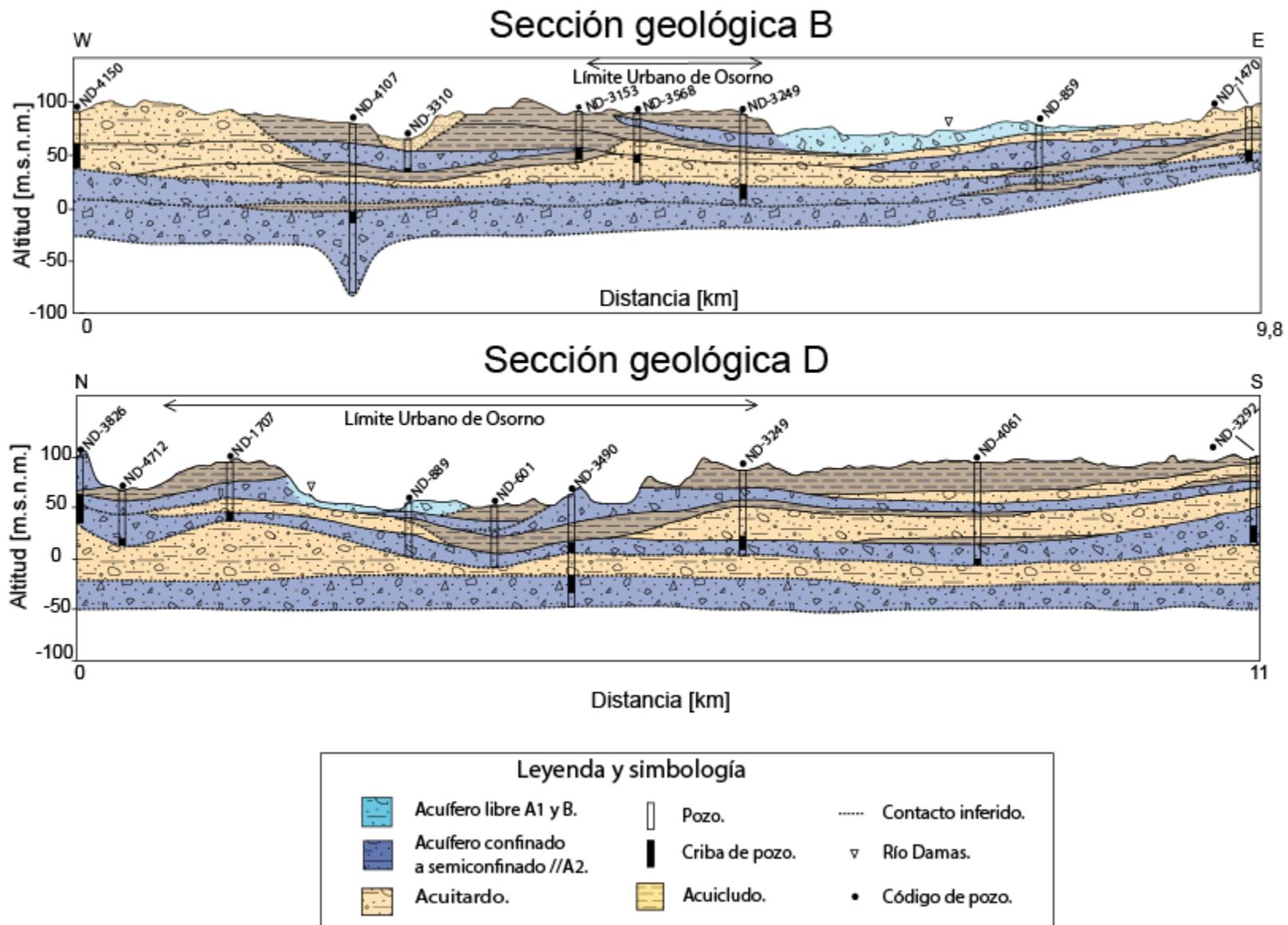


Figura 62: Esquema de distribución de unidades hidrogeológicas según la correlación de unidades definidas por Pérez (2014) y las secciones geológicas.

Para estimar otros parámetros hidrogeológicos se determina a qué profundidad se halla cada criba y sobre qué estrato se extrae agua. En general, cerca del 70% de caudales concedidos son menores a 10 [L/s]. En la figura 40, se observa que los pozos con caudales mayores están principalmente distribuidos en aquellos que captan sobre el acuífero intermedio o que captan en diferentes unidades. En la figura 63 se observa una nube de dispersión, que compara para cada pozo el caudal real concedido en los derechos de aguas con un caudal teórico. Este último se obtiene de la velocidad de Darcy, la que se multiplica por una sección transversal que supone un acuífero de 30 [m] de profundidad y 6 [km] de un largo equivalente a Osorno. Los valores que se encuentran bajo la bisectriz tendrían un caudal teórico menor que el concedido por los derechos de pozos. Hay que tener en cuenta que las dimensiones de acuífero pueden estar subestimadas, debido a la complejidad de la zona; entonces, si la sección transversal es mayor, puede haber mayores caudales. Además, se puede los datos ligados a la información de las pruebas de bombeo podría contener errores de medición. Los datos de caudal real son detallados en el anexo 5.

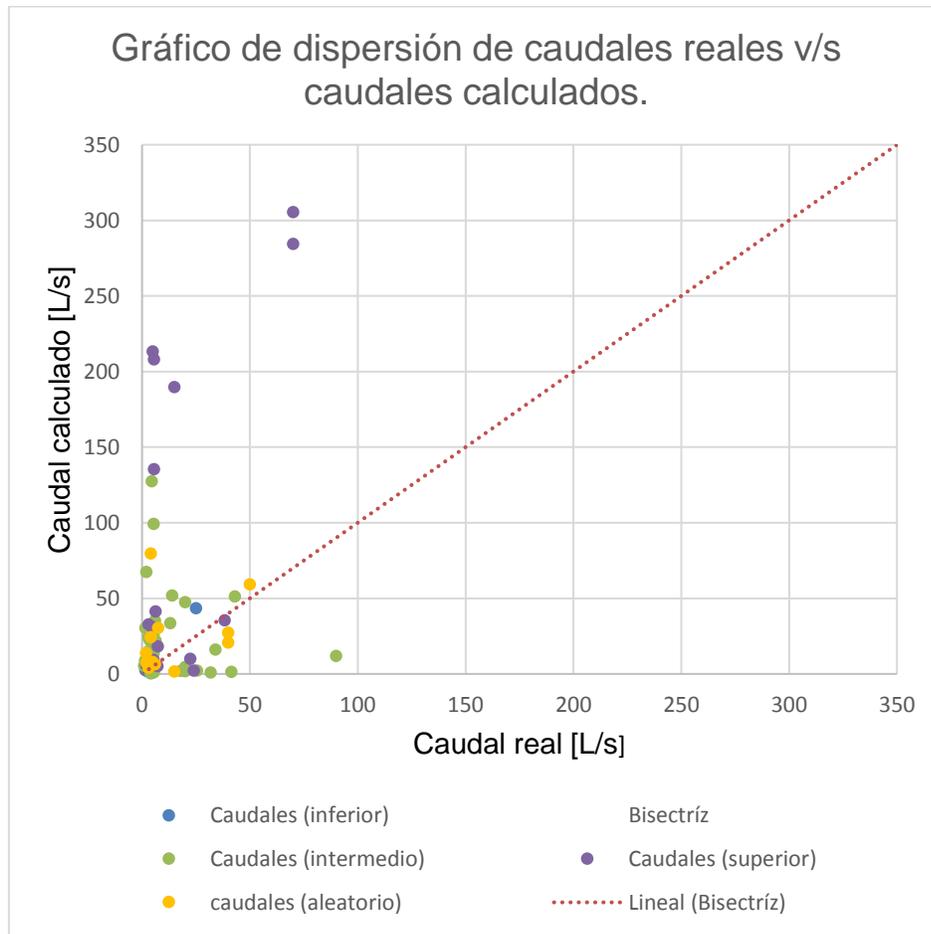


Figura 63: Gráfico de dispersión de caudales reales respecto a caudales teóricos para los diferentes pozos. La leyenda indica sobre qué pozos se encuentra la criba que capta el agua subterránea.

Por otra parte, para los abatimientos (figura 41) no se reconoce alguna tendencia, es decir, que la distribución es bastante homogénea. A pesar de esto, los pozos con mayores abatimientos se ligan principalmente a pozos que captan sobre el acuífero intermedio, específicamente hacia el oeste de la zona urbana de Osorno. Esto es consistente con

que hacia el oeste hay mayor presencia de unidades menos permeables, lo que se sostiene con los resultados de transmisividad.

Dentro de la ciudad de Osorno la transmisividad hidráulica es mayor hacia el este con valores entre los 100 y 500 [m²/d], mientras que en el resto de la ciudad varían entre los 10 y 500 [m²/d]. A partir de los rangos de transmisividad que propone Iglesias, (2002), la transmisividad al este de la ciudad se define de media a alta, mientras que dentro del resto de la ciudad es definida como baja a media alta. Por otra parte, la transmisividad registrada aquellos pozos que captan en el acuífero superior es alta porque varía generalmente entre 500 y 1000 [m²/d], aunque se puede hallar valores muy bajos (<10 [m²/d]). En el acuífero intermedio se puede encontrar valores de acuíferos de bajos a altos, es decir, entre 10 y 1000 [m²/d], mientras que las captaciones del acuífero inferior presentan bajas transmisividades.

La conductividad hidráulica se encuentra, en general, entre 1 y 10² [m/d] dentro de toda la zona de estudios, lo que evidencia buenos acuíferos según Custodio & Llamas (1983).

Entonces, si bien la geología de la zona de estudio es compleja debido a que presenta diferentes unidades con diversas propiedades hidrogeológicas, es posible determinar dos potenciales acuíferos. Uno superficial libre que se encuentra ligado al cauce de ríos principales, determinado por parámetros hidrogeológicos que lo caracterizan como un buen acuífero. Sin embargo, el mayor potencial hidrogeológico recae sobre el acuífero //A2 definido por Pérez *et al.* (2014), ya que se extiende a lo largo de toda la zona de estudio, se encuentra cubierto e intercalado por unidades con características hidrogeológicas de acuitardos al presentar gravas o arenas con cierto contenido de arcillas y, en menor medida, como acuícludos cuando la arcilla es predominante en el tipo de depósito. De esta forma se determina que hay dos niveles de acuíferos que pueden estar interconectados, pero la unidad definida como acuífero intermedio o //A2 posee una mayor concentración de captaciones, extrayendo mayores caudales y caracterizada por parámetros hidrogeológicos que la clasifican como un buen acuífero, lo que es consistente con el alto contenido de gravas y arena que presenta la unidad.

El mapa que muestra la velocidad real (figura 44) expone dos poblaciones de datos separadas por un límite de 0,2 [m/d], los resultados que superan a este límite representan aquellos pozos en que se puede considerar la presencia de un flujo de alta velocidad. La importancia de este parámetro recae en la estimación del sHE. A partir del mapa, se puede observar un régimen de alta velocidad ligado a aquellos pozos ubicados en las cercanías del cauce del río Damas, entre el acuífero superior e intermedio. Hay que notar que la porosidad efectiva escogida según la literatura es de un 20%, pero este valor podría estar sobrestimado considerando las características del suelo. En la figura 64 se genera un análisis de sensibilidad que expresa la variación de la velocidad real en función de la velocidad de Darcy y la porosidad, se observa que para bajas porosidades la velocidad real se ve fuertemente aumentada cuando se incrementa la velocidad de Darcy, mientras que para mayores porosidades esta variación es menor. Entonces hay que considerar que, si la porosidad está sobrevalorada, entonces la velocidad real estaría subestimada. Este análisis tiene una implicancia directa en el cálculo de velocidades reales y, por ende, en la estimación del sHE de cada pozo. Si se toma una menor porosidad se debe esperar un mayor potencial de extracción de calor del suelo, aumentando las posibilidades para la instalación de sistemas verticales cerrados.

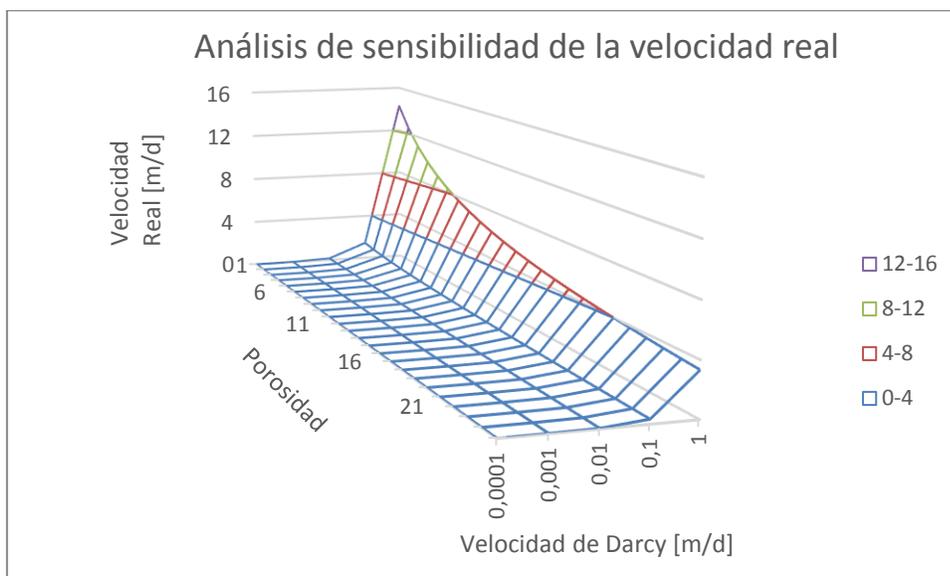


Figura 64: Análisis de sensibilidad de la velocidad real en función de la porosidad y la velocidad de Darcy.

Los perfiles de temperaturas medidos en aguas subterráneas no indican una variación significativa respecto a la profundidad. Tampoco hay una variación importante en el mapa de interpolación de temperaturas de la figura 47. Los leves cambios de temperatura pueden ser efecto de variaciones en la conductividad hidráulica o mezcla de fluidos provenientes de diferentes unidades, además del efecto generado por el gradiente geotermal. A pesar de esto, la temperatura del agua subterránea en Osorno se mantiene relativamente constante. La figura 47 presenta un mapa de isotermas con una zona fría al centro de Osorno (azul), pero se debe considerar que la leyenda colores muestra variaciones menores a 1 [°C]. Además, la estimación no cuenta con los suficientes datos para generar un modelo con mayor robustez. De acuerdo con el anexo 8, la estimación más confiable se establece en el centro de la zona de estudio.

Por otra parte, el Plan Regulador Comunal en conjunto con imágenes satelitales y la experiencia en terreno, entrega nociones sobre el tipo de viviendas que hay en cada zona, permitiendo rezonificar la ciudad según las tipologías definidas por la UNTEC (2014). Sin embargo, estas viviendas no representan necesariamente la realidad de los hogares en Osorno, pues sus características responden a estándares medidos en casas chilenas, por ende, en cada zona existen viviendas que no se relacionan a las características establecidas por la UNTEC. Además, un 89% de la población de viviendas de Osorno se construyó antes del año 2000, quedando exentas de cualquier exigencia térmica. Esto causa que el estudio de la demanda indique un mayor consumo energético que el esperado en viviendas acondicionadas térmicamente. Dado lo anterior, se asume que el mejoramiento de sistemas de calefacción de viviendas en Osorno requiere estudios previos que contemplen un acondicionamiento adecuado de viviendas.

Para la rezonificación de Osorno se utilizaron parámetros superficiales y estructurales definidos en cada tipología de la UNTEC. Estos permitieron correlacionar las tipologías de viviendas expuestas en los informes UNTEC y CREARA. La importancia de las viviendas presentadas por CREARA (2013) es que caracterizan la ocurrencia de viviendas dentro de Osorno. Entonces es crucial introducir la variable socioeconómica porque permite relacionar la distribución espacial de la población y sus viviendas. Si bien

la caracterización socioeconómica se genera mediante imágenes satelitales, experiencia en terreno y mapas obtenidos del PLADECO presentado por Ilustre Municipalidad de Osorno (2013) (anexo 4); no hay información pública que precise en detalle cómo se distribuyen los estratos sociales en Osorno.

Por otra parte, el uso de la superficie predial mínima y el coeficiente de ocupación del suelo para conocer qué tipologías estarían permitidas en cada zona, no permite hacer una correlación fidedigna porque no todas las viviendas se encuentran dentro de la normativa establecida en el PRC. La superficie predial mínima sólo permitirá superficies mayores a esta en cada zona, por ende, aquellas viviendas con menor superficie deben ser complementadas por un espacio libre mayor. Por otra parte, el coeficiente de ocupación del suelo máximo restringe a la superficie libre disponible, es decir, se incurre en una subestimación de esta. En realidad, cada vivienda puede poseer una superficie mayor que la $SP_{mín}$ o un COs menor que el máximo, pero dependerá del caso. Por esto se analiza cada variable límite.

Considerando que la bomba de calor es óptima supliendo sólo un 60% de la demanda total, es que los análisis se enfocan en este escenario. La demanda térmica ha sido calculada para 2562 horas, contemplando aquellas temperaturas menores a 19 [°C] en invierno entre las 19:00 y 07:00. Si se estudia un caso límite en que las viviendas se calefaccionan cuando la temperatura es menor a 19 [°C] (temperatura de confort), entonces las horas de consumo ascienden a 7821, triplicando el consumo. Las tipologías de vivienda no superan los 8,53 [kW] de potencia demandada, mientras que la demanda es mayor en las tipologías T3 y T6, pues existe una relación directa entre la superficie de la vivienda y la demanda asociada. Por otra parte, luego de ponderar la demanda para tipologías de vivienda en cada zona, se observa que las que presentan mayores demandas y requieren mayor superficie libre corresponden a las zonas C4 y H1.

De la temperatura estimada del suelo (figura 50) y del COP estimado para sistemas horizontales cerrados (figura 51), se desprende que ambos modelos son sensibles a variaciones de la profundidad. Pues, a mayor profundidad, la amplitud entre las temperaturas anuales extremas disminuye y se produce un mayor desfase respecto a la temperatura superficial anual. En resumen, en sistemas emplazados a mayor profundidad, el COP y la temperatura de la fuente presentan menor variación temporal. Por otra parte, el comportamiento del COP a profundidades de 1,5 [m] permite trabajar con su valor mínimo, pues no se justifica alcanzar una superficie de emplazamiento más profunda. Así, se reducen los costos de excavación y la cantidad de material que se desea extraer.

Para bombas de calor acopladas a intercambiadores horizontales cerrados (GCHP horizontales), el potencial de extracción de calor necesario para satisfacer al 60% de la demanda térmica en las diferentes viviendas varía entre 1,9 y 6,1 [kW] (tabla 27), cuando el sistema trabaja con un COP mínimo y se instala a 1,5 [m] de profundidad. Del mismo modo, la estimación de la superficie necesaria para generar este potencial varía entre los 97 y 303 [m²]. En el caso de optar por una profundidad o COP mayor, se debe extraer entre un 1-2% más energía y si se desea suplir un 100% de la demanda térmica, también se debe contar con una superficie mayor.

Al estimar la superficie libre en sistemas GCHP horizontales para cada vivienda se analizan dos escenarios. En primer lugar, se consideran tipologías construidas según un

coeficiente de ocupación de suelo (COs) máximo, entonces la superficie libre no podría generar el potencial térmico en ningún caso. En este escenario, la superficie libre de cada tipología es subestimada. En segundo lugar, se considera la superficie predial mínima (SPmín) como variable de decisión. Al ser una superficie mínima establecida en subdivisiones prediales, si la suma entre la superficie útil definida para cada tipología de vivienda y la superficie libre requerida para instalar un GCHP horizontal, dada una zona del PRC redefinido, es mayor que la SPmín; entonces se cuenta con un área disponible para la instalación del sistema. Bajo este criterio, el sector más propicio para instalar GCHP horizontales es la zona E, lo que resulta evidente entendiendo que estas áreas se destinan como zonas de esparcimiento y su uso residencial permite viviendas de cuidadores. Por otra parte, la zona H2 no cumple con el criterio para ninguna de las tipologías de viviendas permitidas, mientras que en las zonas restantes el criterio se cumple parcialmente, es decir, sólo en ciertas tipologías permitidas en cada zona es factible la instalación de GCHP horizontales. En el caso de la zona C, las viviendas se contextualizan en el centro de la ciudad, por ende, muchas poseen un COs de 100%, lo que dificulta la instalación de GCHP horizontales.

La ciudad de Osorno tiene un sector industrial diversificado que abarca áreas de gran extensión en zonas periféricas. Del mismo modo, existe un sector agrícola y ganadero no menos importante. Si bien el enfoque de este trabajo es el sector residencial, en Osorno hay un gran potencial para analizar la instalación de bombas de calor geotermales para satisfacer la demanda térmica en sectores industriales o comerciales, además de establecimientos como hospitales, el aeropuerto, entre otras.

Como se mencionó anteriormente, la temperatura del agua subterránea en Osorno no presenta mayor variación, generando un COP valorado entre 5,84 y 5,98 para sistemas verticales abiertos (GWHP). Sin embargo, el modelo no cuenta con suficientes datos por lo que en el anexo 8 se respalda un mapa de error del parámetro estimado. La eficiencia obtenida resulta suficiente para satisfacer un sistema GWHP en cualquier lugar de la ciudad, entonces se decide utilizar un COP mínimo. El estudio de percentiles permite conocer valores reales de caudales otorgados mediante derechos de aguas y con esto se desprende que un 90% de estos derechos admite caudales de al menos 2 [L/s]. Por otra parte, una diferencia de temperaturas de 3 [K] asegura un bajo impacto ambiental; por lo que se considera como variable mínima. La potencia mínima obtenida de la fuente y la potencia generada en GWHP, considerando los parámetros antes mencionados, es de 25,1 [kW] y 30,3 [kW], respectivamente. Del mismo modo, en las tablas 31 y 32, se estudia el comportamiento de la potencia modificando la diferencia de temperaturas y el caudal, resultando en un incremento de la potencia proporcional a esta variación. Al comparar la potencia generada con el 60% de la demanda térmica (figura 57) se obtiene una demanda que se satisface al menos 4 veces en zonas como C4 y H1. El resultado más favorable ocurre en la zona H3, donde se puede satisfacer la demanda hasta 9 veces. Esto propone que los sistemas GWHP pueden satisfacer la demanda térmica total de la ciudad. Además, el excedente energético puede ser utilizado mediante sistemas de agrupamiento de viviendas para reducir costos. Por otro lado, el acuífero bajo la ciudad de Osorno no se ha declarado como restringido o prohibido, esto le resta importancia a la limitante legal, ya que se puede solicitar derechos de aprovechamiento no consuntivos, incluso para caudales mayores, lo que incrementaría considerablemente la potencia de extracción. A modo de ejemplo, se propone extraer un caudal de 5,4 [L/s], correspondiente al 50% de la población de caudales en pozos existentes en la zona,

generando una potencia térmica de 81,7 [kW], la que satisface 24 veces la demanda térmica de la zona H3.

Respecto a la profundidad de perforación de pozos, hay que mencionar que esta se calcula a partir de la ecuación 24 según lo planteado en la metodología. Sin embargo, como se observa en el análisis hidrogeológico, la mayor extracción de aguas subterráneas se produce en el acuífero //A2, específicamente en el acuífero intermedio. Entonces, se considera evaluar perforaciones reemplazando el nivel estático por el nivel del acuífero en la ecuación 24. Evidentemente, al encontrarse el acuífero por debajo del nivel estático, la profundidad de perforación es mayor y los costos asociados también.

En los sistemas verticales cerrados se determina el potencial de extracción específico del suelo mediante la información estratigráfica. Como se mencionó anteriormente, la interpretación de esta información podría contener errores, lo que puede inducir a estimaciones menos certeras, frente a esto se recomienda realizar un estudio de la estratigrafía detallando la granulometría de cada perfil. El sHE resulta mayor al suroeste debido a que los niveles estáticos son más someros que al este y según la tabla 10, las capas saturadas de sedimentos más grueso aportan mayor energía. A pesar de esto la variación de sHE por metro es poco significativa respecto a las zonas de interés, pues los valores medios de cada zona se encuentran entre los 43,9 y 45,5 [W/m].

Integrando la información obtenida en la evaluación de cada sistema de extracción de energía acoplado a una bomba de calor, se observa cuál es el caso más económico para satisfacer la demanda térmica de una vivienda y, por ende, la mejor opción para cada zona, siendo el sistema GCHP horizontal es el más rentable. Hay zonas, como la E, en que la superficie disponible para satisfacer la demanda térmica es suficiente para cada tipología, pero también hay otras en que no se satisface para ninguna tipología de vivienda, como en el caso de H2. En general, la demanda es satisfecha sólo para algunas de las tipologías de vivienda.

Comparando aspectos económicos, tanto en sistemas GWHP como GCHP verticales, se tiene que sólo en la zona H3 es más económico instalar un sistema vertical cerrado por sobre un abierto. Por ende, se considera que generalmente los sistemas verticales abiertos son más eficientes y económicos que los sistemas verticales cerrados. Por otra parte, la disponibilidad del recurso hídrico es relevante al momento de preferir GWHP. Si se desea alcanzar el nivel estático sumado al abatimiento del pozo para disponer del recurso, se plantea un caso en que las perforaciones en sistemas GWHP alcancen al acuífero en lugar del nivel estático. De este modo, habría un alza en la inversión (tabla 34) y zonas como C, H3 y E, serían económicamente más rentable para la instalación sistemas GCHP cerrados.

Según lo anterior, se recomienda la instalación de un sistema cuando se satisface completamente la demanda de la zona para cada tipología de vivienda (figura 59). En el caso de las zonas H1, H3, C y C4, la demanda en cada se satisface parcialmente para diferentes tipologías (figura 56). Como solución se recomienda la instalación de sistemas bombas de calor integrados para cada zona. Del mismo modo, se recomienda la instalación de diferentes sistemas de bombas de calor, según lo indicado en la figura 60, dado el caso de perforaciones hasta el acuífero //A2 en sistemas verticales abiertos.

Considerando que la potencia generada excede a la demanda térmica de las diferentes tipologías de viviendas, se analiza la alternativa generar agrupamientos de viviendas para

dividir el costo de instalación de sistemas GWHP. Así se reduce la inversión según la cantidad de viviendas que permita la fuente de energía. En la figura 61, se observa que bajo esta metodología la demanda energética se puede satisfacer por medio de sistemas GWHP distritales, planteándose como la solución eficiente de este trabajo, puesto que satisface la demanda térmica del total de viviendas en cada zona de Osorno, exceptuando la zona E que permite en su uso de suelo residencial, principalmente, viviendas de cuidadores aisladas. Por otra parte, si se considera alcanzar al acuífero //A2 en sistemas GWHP, la solución sigue siendo más eficiente.

Si bien este estudio considera a la geotermia como una opción factible para reemplazar la demanda de calefacción por leña, se debe tener en cuenta que Osorno tiene una economía irregular ligada a la leña. Por otra parte, la materialidad de las viviendas responde al periodo libre de exigencias térmicas, generando que la calefacción de espacios no sea tan eficiente. La problemática de contaminación actual requiere tomar medidas que regulen el uso indiscriminado de leña, generando políticas que faciliten el acondicionamiento de viviendas. Se recomienda integrar, estudios geológicos y urbanos que mejoren los análisis realizados en este trabajo para obtener mejores resultados y adoptar otras alternativas energéticas renovables que favorezcan la reducción de contaminantes atmosféricos.

6 CONCLUSIONES

Se genera una base de datos hidrogeológica basada en información publicada por la DGA. A partir de los expedientes públicos, se obtienen los principales parámetros medidos en diferentes captaciones de pozos profundos hallados dentro del área de Osorno. Es así como se puede generar una caracterización hidrogeológica determinando la configuración y propiedades de cada unidad. Las estimaciones realizadas indican que hay unidades caracterizadas como buen acuífero con potencial para extraer energía. Estas se encuentran intercaladas por unidades menos permeables con características de acuitardo a acuícludo. La base de datos presenta imprecisiones ligadas al amplio rango de tiempo en que se realizaron las mediciones.

La temperatura de aguas subterráneas que circulan bajo Osorno tiende a ser constante y bordea los 13,3 [°C] y 14 [°C] y con una conductividad hidráulica bimodal que bordea los 200 [μS/cm] y 2000 [μS/cm]. Por otra parte, se estima que la temperatura del suelo a 1,5 [m] de profundidad oscila entre 8,1 [°C] y 15,2 [°C] a lo largo del año.

Otra base de datos recopila la información estratigráfica publicada en expedientes de la DGA. Esta información permite generar secciones geológicas que modelan la disposición de unidades hidrogeológicas en profundidad. De este modo, la información es correlacionada con estudios previos, permitiendo una mejor caracterización de los acuíferos para conocer la disponibilidad del recurso hídrico. Además, permite determinar el potencial de extracción energético (sHE) del suelo. Hay que considerar que la descripción de unidades, tanto en la litología como en la granulometría, es insuficiente para generar modelos robustos.

Mediante la información del Plan Regulador Comunal de Osorno y los informes de UNTEC (2014) y CREARA (2013), se definen 6 tipologías de viviendas representativas de Osorno. Para cada tipología se determina una demanda energética asociada a calefacción de ambientes. Se propone que si una bomba de calor geotermal genera un 60% de la potencia generada, el sistema es capaz de satisfacer un 100% de las necesidades térmicas. Se realiza una sectorización de Osorno definiendo 6 zonas de interés y dos zonas de restricción, las cuales están ligadas a diferentes tipologías y, por ende, a una demanda energética por zona. La demanda térmica ponderada por zonas varía entre 3,4 [kW] y 7,7 [kW].

La ciudad de Osorno se encuentra declarada como una zona de reserva de caudales, lo que no restringe la adquisición de derechos de aprovechamiento de aguas para instalar un sistema vertical abierto. Por otra parte, aún no existe un Proyecto de Ley que regule e impulse el uso directo de la geotermia en Chile. Por otro lado, al evaluar los costos de implementación de cada tipo de intercambiador, se observa que el sistema más económico resulta ser el horizontal, mientras que los sistemas verticales son más costosos debido al alto valor de la perforación. Esto puede entenderse como barrera económica y debe atenderse para que esta tecnología sea una alternativa accesible.

Por otra parte, se analizan los diferentes sistemas de bombas de calor. Los sistemas horizontales cerrados son factibles en la zona E, mientras que en la zona H2 no hay tipologías que cuenten con un área libre suficiente para generar el calor necesario; finalmente, en otras zonas son factibles sólo para ciertas tipologías. En los sistemas verticales abiertos, el recurso hídrico es suficiente para generar el calor necesario para

suplir la demanda térmica de toda la ciudad. Los sistemas verticales cerrados, también cuentan con la fuente de calor necesaria para suplir la demanda térmica, aunque se debe tener en cuenta que las perforaciones necesarias para generar el calor requerido bordean los 100 [m] de profundidad.

Se genera una herramienta de decisión que presenta una zona donde es factible instalar sistemas GCHP horizontales y dos zonas donde es recomendable instalar GWHP. En otras zonas, se integran GCHP horizontales con GWHP como solución óptima. También, se propone un caso en que los sistemas GWHP consideran perforaciones más profundas para asegurar la disponibilidad del recurso hídrico, alcanzando el nivel de acuífero //A2 que posee mejores propiedades hidráulicas. En este contexto, la solución GWHP y GCHP verticales resultan ser opciones altamente comparables al momento de optar por una solución óptima. Sin embargo, al considerar sistemas de agrupamiento distrital, la totalidad de la ciudad puede ser suplida de manera más eficiente con sistemas GWHP. Lo que permite afirmar que en la ciudad de Osorno este tipo de energía renovable es factible y muy favorable en diferentes escenarios, considerando las problemáticas ambientales que presenta Osorno. Por último, en medio de la crisis ambiental que afecta a Chile se propone realizar nuevos estudios en otras ciudades para disminuir y mitigar la contaminación. De este modo, comenzar a generar nueva información y difusión de la energía geotérmica de baja entalpía como una alternativa limpia y renovable.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Aiguasol. (2016). *Estado de desarrollo de proyectos de bombas de calor geotérmicas instalados en Chile. Informe final*. Ministerio de Energía, CIFES, Santiago. Recuperado el 10 de Mayo de 2018
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, INC. (ASHRAE). (2008). *2008 ASHRAE Environmental Guidelines for Datacom Equipment- Expanding the recommended environmental Envelope*. Atlanta.
- Anderson, M. (2005). Heat as a Ground Water Tracer. *Ground water*, 43(6), 951-968. doi:10.1111/j.1745-6584.2005.00052.x
- Andújar, J., Martínez, M., & Gómez, S. (2016). Ground Thermal Diffusivity Calculation by Direct Soil Temperature Measurement. Application to very Low Enthalpy Geothermal Energy Systems. (V. Passaro, Ed.) *Sensors*, 16, 306. doi:10.3390/s16030306
- 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.
- Antonijević, D., Manić, D., Komatina, M., & Rudonja, N. (2012). Groundwater heat pump selection for high temperature heating retrofit. *Energy and Buildings*, 49, 294-299.
- Aquaterra Ingenieros Ltda. (2014). *Determinación de necesidades de reserva de aguas, Art 147 BIS del Código de Aguas-Regiones IX, XIV y X*. SIT, Ministerio de Obras Públicas, Administración de Recursos Hídricos; Dirección General de Aguas, Santiago.
- Asociación Chilena de Empresas de Investigación de Mercado (AIM). (2008). *Grupos socioeconómicos*. Santiago.
- Chow, T., Long, H., Mok, H., & Li, K. (2011). Estimation of soil temperature profile in Hong Kong from climatic variable. *Energy and Buildings*, 43, 3568-3575. doi:10.1016/j.enbuild.2011.09.026
- CLIODINAMICA, asesorías, consultoría e ingeniería LTDA. (2013). *Actualización plan de desarrollo comunal para la I.Municipalidad de Osorno 2013-2017*. Ilustre Municipalidad de Osorno, Secretaría Comunal de Planificación, Santiago. Recuperado el Agosto de 2017
- Conic BF Ingenieros Civiles consultores LTDA. (2010). *Mejoramiento y ampliación de red de aguas subterráneas, regiones VII a X*. Informe Final. SIT, Ministerio de Obras Públicas, División de Estudios y Planificación; Dirección General de Aguas, Santiago. Recuperado el 20 de Julio de 2017
- Cooperación de Desarrollo Tecnológico (CDT). Cámara Chilena de la Construcción. (2010). *Estudio de usos finales y curva de oferta de conservación de la energía en el sector residencial de Chile*. Informe Final y Resumen Ejecutivo, Ministerio de Energía, Santiago. Recuperado el Septiembre de 2017

- CREARA. (2013). *Análisis energético de viviendas para ciudades del centro y sur de Chile y sistematización en la información asociada a la leña. Informe final*. Ministerio del Medio Ambiente, Osorno. Recuperado el 5 de Septiembre de 2017
- Custodio, E., & Llamas, M. (1983). *Hidrología subterránea* (Vol. 1). Barcelona, España: Omega.
- De Swardt, C., & Meyer, J. (2001). A performance comparison between an air-source and ground-source reversible heat pump. *International Journal of Energy Research*, 25(10), 899-910.
- Dirección General de Aguas. (2013). *Análisis y síntesis preliminar de iniciativas sobre recarga artificial en Chile*. SDT, Ministerio de Obras Públicas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Recuperado el Septiembre de 2017
- Dirección General de Aguas. (2015). *Guía para la presentación de solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas*. Ministerio de Obras Públicas, Santiago. Recuperado el Septiembre de 2017
- Elgueta, S., McDonough, M., Le Roux, J., Urqueta, E., & Duhart, P. (2000). Estratigrafía y Sedimentología de las cuencas terciarias de la Región de Los Lagos (39°-41°30'S). *Boletín de la Subdirección Nacional de Geología.*, 57, 1-50.
- Florides, G., & Kalogirou, S. (2007). Ground Heat Exchangers-A review of systems, models and applications. *Renewable Energy*, 32(15), 2461-2478.
- Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS). (2009). *Hidrogeología. Conceptos básicos de hidrología subterránea*. Barcelona: Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea.
- Gamelli, 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, 2474-2483. doi:10.1016/j.renene.2011.02.014
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Education.
- Iglesias, A. (2002). Hidrogeología. En L. González de Vallejo, M. Ferrer, L. Ortuño, C. Oteo, & C. I. (Ed.), *Ingeniería geológica* (págs. 263-302). Madrid, España: Pearson Education.
- Ilustre municipalidad de Osorno. (2007). *Ordenanza Local Plan Regulador de Osorno*. SECPLAN, Osorno. Recuperado el 19 de Octubre de 2016
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2015). *Informe anual 2015, Medio ambiente*. Instituto Nacional de Estadísticas, Subdirección Técnica. Unidad de Estadísticas del Medio ambiente, Santiago. Recuperado el 20 de Abril de 2017
- Kruseman, G., & de Ridder, N. (1990). *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data Second Edition (Completely Revised)*. Wageningen, Netherlands: International Institute for Land Reclamation and Improvements.
- Lahsen, A., Rojas, J., Morata, D., & Aravena, D. (2015). *Geothermal exploration in Chile: Country update*.

- Lund, J., & Boyd, T. (2016). Direct Utilization of geothermal Energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 60, 66-93.
- Martínez, R., & Pino, H. (1979). Edad, paleoecología y sedimentología del Mioceno marino de la cuesta Santo Domingo, Provincia de Valdivia, X Región. *II Congreso Geológico* (págs. 59-90). Arica: Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Mercer, J. (1976). Glacial History of Southernmost South America. *Quaternary Research*, 6(2), 125-166.
- Ministerio de Energía. (2014). *Agenda de Energía. Un desafío país, progreso para todos*. Santiago: Yankovic.net. Recuperado el 13 de Agosto de 2018
- Ministerio de Energía. (2015). *Energía 2050. Política energética de Chile*. Recuperado el 6 de Julio de 2017
- Ministerio de Energía. (2018). *Ruta Energética 2018-2022. Liderando la modernización con sello ciudadano*. Recuperado el 10 de Agosto de 2018
- Ministerio de Medio Ambiente. (2014). *Planes de descontaminación atmosférica. Estrategia 2014 - 2018*. Recuperado el 7 de Julio de 2017
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2016). *Ordenanza general de urbanismo y contrucciones*. Resumen de modificaciones y rectificaciones, Santiago. Recuperado el 6 de Agosto de 2017
- Ministerio del Interior y Seguridad Pública. (28 de Marzo de 2016). Establece Plan de Descontaminación atmosférica para la comuna de Osorno. *Diario Oficial de la República de Chile*, págs. 18-19.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2012). *Reporte 2005-2011 del registro de emisiones y transferencias de contaminantes (RETC)*. Departamento de Estadísticas e Información Ambiental, División de Estudios, Santiago. Recuperado el 7 de Julio de 2017
- Ministerio del Medio Ambiente. (2016). *Informe del estado del medio ambiente*. Recuperado el 10 de Mayo de 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.
- Morales, D., Pizarro, S., & Páez, D. (2015). Anomalías Gravimétricas y Modelos de la Geomorfología de las Cuencas del Río Maullín y Río Bueno, Región de Los Lagos. *Congreso Geológico Chileno*. 14, págs. 743-747. La Serena: Colegio geológico chileno.
- Muñoz, M., Garat, P., Flores-Aqueveque, V., Vargas, G., Rebolledo, S., Sepúlveda, S., Daniele, L., Morata, D., Parada, M. A. (2015). Estimating low-enthalpy geothermal energy potential for district heating in Santiago basin-Chile (33.5°S). *Renewable Energy*, 76, 186-195.
- Mustafa, A. (2008). Ground-source heat pumps systems and application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 344-371. doi:10.1016/j.rser.2006.10.003

- Passerat de Silans, A., Menoteny , B., & Lhomme, J. (1996). Apparent soil thermal diffusivity, a case study: HAPEX-Sahel experiment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 81, 201-216.
- Pérez, Y., Milovic, J., Troncoso, R., Hanisch, J., Helms, F., & Toloczyki, M. (2014). Geología para el ordenamiento territorial: área de Osorno, Región de Los Lagos, Escala 1:100000. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental*(6), 71.
- PipeLife. (2015). Geothermal Piping System. Geothermal energy sustainable into the future. *Pipelife International GmbH*, 32.
- Porter, S. (1981). Pleistocene Glaciation in the Southern Lake District of Chile. *Quaternary Research*, 16(3), 263-292.
- RETSscreen International. (2005). *Clean Energy Project Analysis: RETScreen engineering y cases textbook*. Ottawa - Ontario, Canadá: Natural Resources Canada. Obtenido de www.retscreen.net
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2015). Chapter 5-Ground-Source Heat Pumps Systems. En I. Sarbu, & C. Sebarchievici, *Ground Sources Heat Pumps. Fundamentals, Experiments and Applications* (págs. 71-128). Academic Press.
- Schild, K., Baume, O., Caruso, G., & Leopold, U. (2016). GIS-based modelling of shallow geothermal energy potencial for CO2 emission mitigation in urban areas. *Renewable Energy*, 86, 1023-1036.
- Shepard, F. (1954). Nomenclature based on sand - silt- clay ratios. *Journal of Sedimentary Petrology*, 24(3), 151-158.
- Skarphagen, H. (2006). Grunnvarme - Varmeveksling med grunnen (Ground source heat - heat exchange with the ground: in Norwegian). *Distance learning module developed for the University of Oslo*.
- Troncoso, R., Pérez, Y., Feuker, P., Páez, D., & Muñoz, J. (2008). *Levantamiento hidrogeológico y potencial de agua subterránea de la depresión central de las regiones de Los Ríos y Los Lagos*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- UNTEC. (2014). *Alternativas tecnológicas para calefacción residencial con energías renovables no convencionales aplicables a la realidad chilena. Informe Final*. Universidad de Chile, Programa de gestión y economía ambiental, Santiago.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI). (2004). *4640 Thermal Use of Underground - Ground Source Heat Pump System* (Vol. 2). Berlín, Germany: Beuth Verlag.

8 ANEXOS

Anexo 1: Uso residencial del suelo según PRC de Osorno

Tabla 36: Uso residencial de suelo en las diferentes zonas del PRC de Osorno según la Ordenanza Local del 2007.

Zona	Uso residencial de suelo
C1	Vivienda sólo a partir del segundo piso; y hoteles.
C2	Cualquiera excepto en los frentes de primer piso de las siguientes vías: Calles Los Carrera, Lynch y a. Rosas en toda su extensión; Mackenna y Bilbao (entre Portales y Prat); -portales, Bulnes, O'Higgins, Matta, Cochrane y Freire (entre Los Carrera y la zona C3; y Calle Prat entre Los Carrera y Mackenna. Moteles.
C3	Cualquiera, excepto en los frentes de primer piso de las siguientes vías: Calle Ramírez y Lynch; República (desde Victoria hacia el oriente); Rodríguez entre Bulnes y Freire; Bulnes, O'Higgins, Matta, Cochrane y Freire, entre Rodríguez y la zona C2.
C4	Residencial
H1	Vivienda excepto moteles.
H1.A	Residencial, excepto moteles.
H2	Vivienda y hospedaje (excepto moteles) con hoteles sólo en las vías mayores o iguales a 20 m entre líneas oficiales.
H3	Residencial excepto moteles.
I	Sólo vivienda de cuidador.
M1	Sólo vivienda de cuidador.
E1	Vivienda para cuidador y hospedaje, excepto moteles.
E2	Sólo vivienda de cuidador.
E3	Sólo albergues y viviendas para estudiantes.
E4	Vivienda para cuidador y hospedaje.
E5	Sólo vivienda para director, académicos y cuidador.
E6	Restricción de cementerios.
E7	Resguardo Recintos militares y Carcelarios.
E8	Restringido para vivienda.
R1	Protección de Quebradas naturales.
R2	Protección de trazados ferroviarios.
R3	Alto Riesgo para Asentamientos Humanos.
R4	Protección de vertientes, esteros y cauces naturales de agua.
R5	Protección de pozos de captación, plantas de filtros y estanques de agua potable, y de plantas y lagunas de tratamientos de aguas servidas.
R8	Protección de subestaciones Eléctricas y Trazados de Alta Tensión.
R9	Preservación del Medio Ambiente Cultural.
R10	Restricción de aeródromos.
R11	Protección de Rutas nacionales.
IP	Área de interés paisajístico.

Anexo 2: Industria chilena de bombas de calor.

Tabla 37: Empresas nacionales de distribución de bombas de calor. Fuente: Aiguasol (2016)

#	Empresa	Venta	Servicio Técnico	Consultoría	Instalación	Perforación	Ciudad
1	Complex	-	-	X	X	-	Santiago
2	Geoestudios	-	-	X	-	-	Santiago
3	Terraignota	-	-	X	-	-	Santiago
4	Perfomarq	X	X	-	X	X	Osorno
5	Aiguasol	-	-	X	-	-	Santiago
6	Antusolar	X	X	X	-	-	Santiago
7	CEGA	-	-	X	-	-	Santiago
8	Climatiza	X	X	X	X	X	Talca
9	ECM Ingeniería	X	X	X	X	X	Santiago
10	Enalteco	X	X	X	X	X	Concepción
11	Enativa	X	X	X	X	-	Santiago
12	Energy-Tracking	-	-	X	X	-	Santiago
13	Geomarket	X	X	X	X	X	Santiago
14	GTN LA	-	X	X	-	X	Santiago
15	Improve	-	-	X	X	X	Concepción
16	Midea Carrier	X	X	X	-	-	Santiago
17	Natclima	X	X	X	X	-	Santiago
18	Nueva Energía	X	X	-	-	-	Santiago
19	Oden	X	X	X	X	X	Santiago
20	Poch	-	-	X	-	-	Santiago
21	RGS Energía	X	X	X	X	X	Ovalle
22	Roda Energía	-	-	X	-	-	Santiago
23	Servilandminergy	-	-	-	-	-	Santiago
24	Solar del Valle	X	X	X	X	-	Santiago

25	Voher	X	X	X	X	X	Villa Alemana
26	EE Chile	-	-	X	-	-	Valdivia
27	ANWO	X	X	X	X	X	Santiago
28	Farenhouse	-	-	-	-	-	Santiago
29	Ferrosur	-	-	-	X	-	Temuco
30	Geo-operaciones	-	-	-	-	-	Copiapó
31	Geotec	-	-	-	-	-	Santiago
32	Ghm consultores	-	-	X	-	-	Santiago
33	Hildenbrant	-	-	-	-	-	Santiago
34	Isener	-	-	-	-	-	Santiago
35	Kaitemp	-	-	-	-	-	Santiago
36	Bosch	-	-	-	-	-	Santiago
37	Chilectra	-	-	-	-	-	Santiago
38	Rehau	-	-	-	-	-	Santiago

Anexo 3: Materialidad de tipologías de vivienda

Tabla 38: Materialidad de las viviendas consideradas por el informe de la UNTEC para calcular las ganancias y pérdidas térmicas para determinar la demanda (Tipología 1).

Tipología 1	
Elementos	Materialidad
Muros exteriores	Albañilería reforzada a máquina
	Mortero de pega 1:4
	Hormigón Armado (cadenas y pilares)
	Revestimiento mortero cemento
	Pintura lavable
Muros interiores	Madera
Ventanas	Marco metálico + vidrio simple
Pisos	Hormigón 250 kg cem/m ³
	Pavimento Palmetas superflexit
Cielo	Madera aglomerada
Puertas	Placa terciada y marco metálico

Tabla 39: Materialidad de las viviendas consideradas por el informe de la UNTEC para calcular las ganancias y pérdidas térmicas para determinar la demanda (Tipologías 3 y 6).

Tipología 3 y 6	
Elementos	Materialidad
Muros exteriores 1° Piso	Albañilería reforzada Ladrillo fiscal
	Mortero de pega 1:3
	Hormigón Armado (cadenas y pilares)
	Revestimiento estuco de mortero
	Látex
Muros exteriores 2° Piso	Madera pino tratada
	Planchas masissa
Muros interiores 1° Piso	Albañilería fiscal mortero 1:3
	Madera pino tratada
Ventanas	Marco metálico + vidrio simple
Pisos	Hormigón 170 kg cem/m ³
	Pavimento alfombra (dormitorios, estar)
Cubierta	Fibrocemento
Cielo	Planchas de madera
	Aislan
Puertas	Placa terciada y marco de madera

Tabla 40: Materialidad de las viviendas consideradas por el informe de la UNTEC para calcular las ganancias y pérdidas térmicas para determinar la demanda (Tipología 4).

Tipología 4	
Elementos	Materialidad
Muros exteriores	Tabiques de madera 2 x 3 "
	Planchas de fierro galvanizado
	Revestimiento interior de yeso cartón
Muros interiores	Estructura y revestimiento de madera
Ventanas	Marco madera + vidrio simple
Pisos	Hormigón 250 kg cem/m ³
	Machimbrado de pino
Cubierta	Planchas de acero
Cielo	Entablado de pino 1x2"
	Poliestireno expandido
Puertas	Terciado + marco madera

Tabla 41: Materialidad de las viviendas consideradas por el informe de la UNTEC para calcular las ganancias y pérdidas térmicas para determinar la demanda (Tipologías 5 y 7).

Tipología 5 y 7	
Elementos	Materialidad
Muros exteriores	Albañilería de ladrillos hecho a mano
	Mortero de pega 1:3
	Hormigón Armado (cadenas y pilares)
Muros interiores	Albañilería de ladrillos hechos a mano
Ventanas	Marco metálico + vidrio simple
Pisos	Hormigón H15
Cubierta	Planchas de Zinc
Cielo	Placa madera
Puertas	Placas maderas y marco metálico

Anexo 4: Distribución socioeconómica

		N° CANTIDADES DE BIENES DEL HOGAR (Ducha + TV color + Refrigerador + Lavadora + Calefont+ Microondas + TV Cable o Satelital + PC + Internet + Vehículo)										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NIVEL DE ESTUDIOS	Sin estudios	E	E	E	E	E	D	D	D	D	C3	C3
	Básica incompleta	E	E	E	E	E	D	D	D	C3	C3	C3
	Básica Completa	E	E	D	D	D	D	D	C3	C3	C3	C3
	Media incompleta	D	D	D	D	D	D	D	C3	C3	C3	C2
	Media Completa	D	D	D	D	C3	C3	C3	C3	C2	C2	C2
	Técnica incompleta	C3	C3	C3	C3	C3	C2	C2	C2	C2	C2	ABC1
	Técnica completa o universitaria incompleta	C3	C3	C3	C3	C3	C2	C2	C2	C2	ABC1	ABC1
	Universitaria	C3	C3	C3	C3	C3	C2	C2	C2	ABC1	ABC1	ABC1

Figura 65: Clasificación de la Población en función del estrato socioeconómico. Modificado de (CREARA, 2013). Fuente: Adimark. Investigaciones de Mercado y opinión pública 2007.

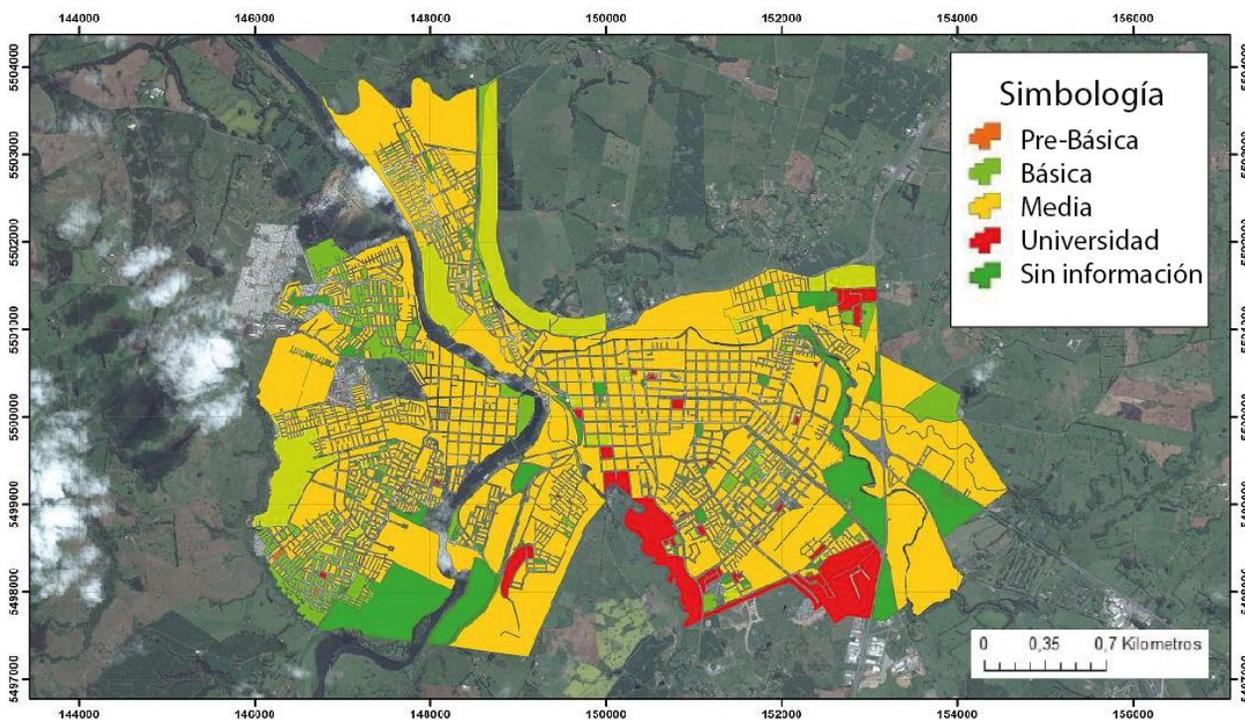


Figura 66: Mapa territorial, nivel educacional alcanzado. Fuente: Ilustre Municipalidad de Osorno (2013) basado en Censo 2002.

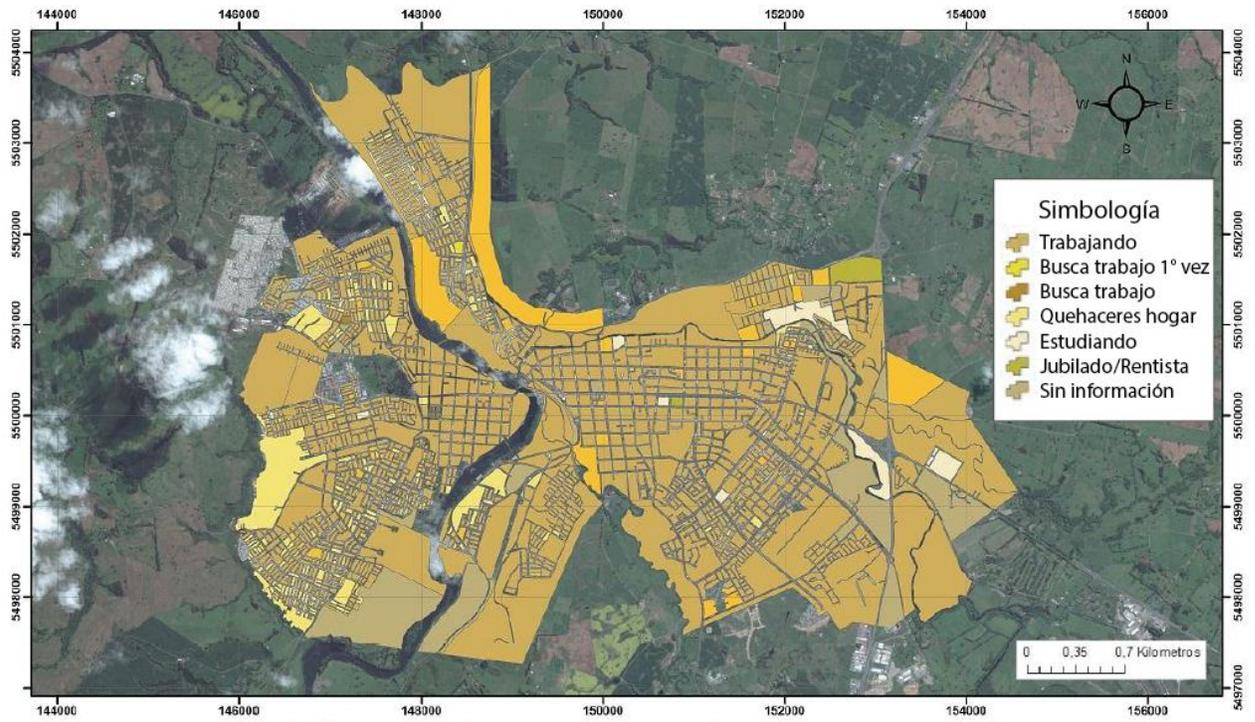


Figura 67: Mapa distribución de la población según ingresos. Fuente: Ilustre Municipalidad de Osorno (2013) basado en Censo 2002.

Anexo 5: Base de datos hidrogeológica

Tabla 42: Base de datos hidrogeológica. Q: caudal, NE: nivel estático, ND: nivel dinámico, CH: cota hidráulica, T: transmisividad, K: conductividad hidráulica, Vr: velocidad real, i: gradiente hidráulico y Qt: caudal teórico.

Código	Norte [m]	Este [m]	Altitud [m]	Q [L/s]	NE [m]	ND [m]	CH [m]	T [m ² /d]	K [m/d]	Vr [m/d]	i	Qt [L/s]
ND-1032	5508721	660455	84	2	14,50	16,91	69,5	70	4,67	8,94E-02	0,38	31,04
ND-1049	5502794	667280	105	2	14,50	16,90	90,5	70	4,67	2,01E-03	0,01	0,70
ND-1095	5508539	670395	112	54	5,88	48,59	106,12	-	-	-	-	-
ND-1130	5508290	670585	114	2,7	4,20	10,41	109,8	-	-	-	-	-
ND-1237	5508116	658683	64	4,2	12,05	22,89	51,95	41	2,73	2,58E-02	0,19	8,97
ND-1239	5511377	663597	93	14,5	19,84	87,13	73,16	-	-	-	-	-
ND-1260	5516745	666119	106	2	20,10	20,11	85,9	88000	5860	4,98E+01	0,17	17275,10
ND-1277	5509253	660793	91	2	32,00	32,04	59	32300	2150	4,49E+01	0,42	15588,13
ND-1470	5503315	665348	101	4	17,00	18,65	84	298	19,9	9,38E-02	0,09	32,56
ND-1520	5511843	663957	66	22,3	6,00	79,42	-	26,7	1,78	1,18E-02	0,13	4,09
ND-1521	5507215	663897	97	70	19,77	38,35	77,23	396	26,4	1,94E-01	0,15	67,33
ND-1530	5507728	653992	93	1,8	51,50	64,15	41,5	-	-	-	-	-
ND-1533	5501928	651632	115	5	42,35	44,15	72,65	178	11,9	1,49E-02	0,03	5,17
ND-1535	5503417	666078	97	1,8	8,82	10,26	88,18	102	6,77	1,63E-02	0,05	5,65
ND-1574	5499438	659347	96	5,4	11,07	14,89	84,93	151	10,1	1,01E-01	0,20	35,12
ND-1729	5517259	666562	105	13	19,00	38,22	86	77,6	5,17	5,96E-02	0,23	20,68
ND-1753	5506975	663966	96	7,2	11,08	15,43	84,92	-	-	-	-	-
ND-1861	5509287	661040	90	5	35,10	35,60	54,9	108000	7190	9,53E+01	0,27	33103,71
ND-1889	5504084	660969	88	2,6	32,00	46,64	56	15	1	4,97E-03	0,10	1,73
ND-1905	5501956	662224	86	5	6,72	47,98	79,28	-	-	-	-	-
ND-2009	5504973	660845	60	3,5	53,00	75,84	-	8,18	0,546	3,44E-03	0,13	1,20
ND-2868	5507412	653573	92	1	29,07	85,14	62,93	1,04	0,0692	5,68E-04	0,16	0,20
ND-2869	5507538	653834	91	2	60,14	95,74	30,86	4,07	0,271	3,55E-03	0,26	1,23

ND-2980	5502811	658657	84	14	34,30	67,61	49,7	62,9	4,19	7,82E-02	0,37	27,16
ND-2981	5509385	670797	109	90	3,00	31,78	106	404	26,9	1,26E-02	0,01	4,38
ND-3034	5513783	667334	103	5,4	7,86	13,70	95,14	86,7	5,78	3,39E-02	0,12	11,77
ND-3043	5499658	655848	98	1,5	43,00	43,40	55	447	29,8	2,86E-01	0,19	99,19
ND-3050	5512046	657583	87	38,3	27,75	45,54	-	194	12,9	6,40E-02	0,10	22,22
ND-3104	5513187	656521	108	4,6	31,34	34,01	76,66	198	13,2	4,61E-02	0,07	16,01
ND-3153	5503284	660267	90	7,4	17,17	26,99	72,83	56,2	3,75	3,91E-02	0,21	13,57
ND-3158	5519631	666632	106	2,5	50,76	55,00	55,24	-	-	-	-	-
ND-3159	5519521	666804	108	5	30,46	34,48	77,54	146	9,71	1,47E-01	0,30	51,13
ND-3248	5501302	662309	94	5,4	6,08	22,20	87,92	30,5	2,03	6,10E-03	0,06	2,12
ND-3249	5503039	661528	85	25	26,90	50,19	58,1	69,2	4,61	6,82E-02	0,30	23,69
ND-3292	5498804	660840	102	43	21,03	40,93	80,97	251	16,7	7,58E-02	0,09	26,33
ND-3310	5503106	658847	66	3,6	0,48	13,81	65,52	25,2	1,68	2,56E-02	0,31	8,91
ND-3337	5507486	664123	95	70	19,77	38,35	75,23	390	26	1,49E-01	0,11	51,87
ND-3339	5519838	668576	106	1,5	27,11	28,85	78,89	-	-	-	-	-
ND-3459	5510826	662559	92	50	22,05	44,48	69,95	270	18	8,72E-02	0,10	30,29
ND-3490	5504581	661086	69	20	24,12	39,17	44,88	141	9,4	6,95E-02	0,15	24,14
ND-3533	5515837	666161	104	6	20,32	26,76	83,68	110	7,33	6,30E-02	0,17	21,87
ND-3568	5503428	660730	90	5,5	21,55	25,58	68,45	115	7,68	1,19E-01	0,31	41,28
ND-3572	5507742	664046	96	40	14,00	46,06	82	99,6	6,64	3,76E-02	0,11	13,04
ND-3577	5506693	670482	112	34	7,60	54,87	104,4	63,1	4,21	1,85E-02	0,09	6,43
ND-3595	5503651	659325	86	1,4	20,90	31,65	65,1	13,8	0,917	6,07E-03	0,13	2,11
ND-3705	5505835	667752	107	7,3	14,08	18,61	92,92	138	9,23	2,11E-02	0,05	7,34
ND-3786	5503716	660809	94	5,6	33,05	35,97	60,95	121	8,05	1,36E-01	0,34	47,37
ND-3902	5508812	661065	91	3	18,00	28,34	73	28,1	1,88	2,68E-02	0,28	9,30
ND-4035	5515325	665271	99	3	15,00	22,42	84	66,1	4,41	2,85E-02	0,13	9,89
ND-4036	5514758	664210	96	1,5	22,00	27,10	74	130	8,65	4,34E-02	0,10	15,06
ND-828	5510670	662450	86	6,2	10,64	14,33	75,36	141	9,38	6,73E-02	0,14	23,37
ND-918	5510812	663225	97	40	20,95	67,61	76,05	70,4	4,69	2,12E-02	0,09	7,37
ND-4055	5509826	661696	95	3	27,30	33,12	67,7	82,4	5,49	5,23E-02	0,19	18,14

ND-4061	5500968	662266	94	5,2	17,84	30,38	76,16	40,6	2,7	6,81E-03	0,05	2,36
ND-4107	5503129	658388	80	15	29,54	43,91	50,46	113	7,55	1,25E-01	0,33	43,35
ND-4150	5503531	656098	91	4,5	41,00	44,90	50	133	8,9	1,02E-01	0,23	35,39
ND-4164	5504084	660818	87	3	31,73	34,96	55,27	79,5	5,3	1,67E-02	0,06	5,81
ND-4298	5500400	659941	92	6	7,80	43,51	84,2	9,21	0,614	3,01E-03	0,10	1,05
ND-4317	5514397	658966	99	4	7,42	37,57	-	12,9	0,859	4,48E-03	0,10	1,55
ND-4341	5508649	660269	79	5	9,00	40,64	70	10,9	0,729	5,51E-03	0,15	1,91
ND-4344	5510253	659801	92	4	29,08	42,68	62,92	54,1	3,6	2,79E-02	0,16	9,69
ND-4356	5501011	662654	92	5,4	11,80	16,14	80,2	109	7,26	1,54E-02	0,04	5,34
ND-4358	5499148	661762	99	2,4	13,60	31,42	85,4	7,73	0,515	2,49E-03	0,10	0,86
ND-4591	5510641	665931	95	6,2	8,80	17,35	86,2	45,7	3,04	2,26E-02	0,15	7,86
ND-4712	5508240	659832	68	4	13,92	21,96	54,08	58,1	3,87	7,94E-03	0,04	2,76
ND-1119	5511050	656580	71	31	14,70	32,65	56,3	-	-	-	-	-
ND-3178	5505395	655978	41	41,4	8,82	49,73	32,18	76,9	5,13	1,91E-01	0,74	79,60
ND-3340	5507833	656901	65	45	25,95	45,85	39,05	162	10,8	1,66E-02	0,03	6,91
ND-3649	5509736	656282	44	27	11,00	36,52	33	-	-	-	-	-
ND-3697	5498670	656501	90	3	37,80	53,00	-	13	0,866	-	-	-
ND-4021	5504645	661889	70	5,5	11,56	17,60	58,44	134	8,92	5,12E-01	1,15	213,29
ND-889	5506055	661084	56	31,8	10,35	22,81	45,65	204	13,6	4,55E-01	0,67	189,55
ND-993	5511016	656799	70	5	36,75	41,86	33,25	160	10,6	4,99E-01	0,94	208,03
ND-994	5504218	663061	68	4	7,50	17,42	60,5	42,1	2,81	8,02E-02	0,57	33,42
Os301	5505639	656356	40	0	21,80	0,00	18,2	-	-	-	-	-
Os302	5505542	656925	46	0	11,40	0,00	34,6	-	-	-	-	-
Os304	5507475	659398	51	0	4,50	0,00	46,5	-	-	-	-	-
ND-1008	5511243	658057	81	7,1	37,00	73,58	-	22,2	1,48	1,03E-02	0,14	4,28
ND-1072	5503720	662756	68	20	7,75	23,62	60,25	143	9,51	3,06E-01	0,64	127,39
ND-1222	5505412	661189	50	3,5	14,35	14,75	35,65	3700	247	6,38E+00	0,52	2657,73
ND-1469	5501724	665707	83	3	14,92	15,36	68,08	599	39,9	6,82E-01	0,34	284,26
ND-1471	5503089	665218	88	3	17,00	18,61	71	207	13,8	3,25E-01	0,47	135,26
ND-1518	5502242	666093	89	5,5	11,22	14,08	77,78	254	17	7,33E-01	0,86	305,31

ND-1707	5507674	660666	99	1,5	32,80	49,63	66,2	6,62	0,441	1,86E-02	0,84	7,76
ND-1820	5502619	666595	95	25,5	15,37	46,95	79,63	95,4	6,36	7,26E-02	0,23	30,23
ND-3240	5502850	658860	79	2	10,50	57,36	-	4,82	0,321	-	-	-
ND-3584	5502004	663422	77	6,6	14,00	19,05	63	-	-	-	-	-
ND-3884	5505746	659093	67	24	24,40	43,67	42,6	187	1,25	1,07E-02	0,17	4,46
ND-3885	5505846	659140	68	18	22,90	44,82	45,1	134	8,95	6,01E-02	0,13	25,05
ND-859	5502343	663891	77	3,6	14,22	22,47	62,78	-	-	-	-	-
ND-1965	5502592	667045	101	2,8	18,02	28,99	82,98	-	-	-	-	-
ND-3063	5503454	663559	77	20	2,50	53,12	74,5	43	2,87	3,31E-02	0,23	13,80
ND-4184	5506491	661093	57	15	24,16	33,10	32,84	-	-	-	-	-
ND-4204	5506546	660855	50	15	24,16	33,10	25,84	966	6,44	1,42E-01	0,44	59,14
ND-4247	5502447	666071	86	4	4,00	12,20	82	-	-	-	-	-
ND-4729	5499679	666109	85	4	9,00	21,74	76	-	-	-	-	-

Anexo 6: Base de datos de temperaturas medias diarias.

Tabla 43: Base de datos de temperaturas ambientales y del suelo a diferentes profundidades en Osorno.

Tiempo [días]	Temperatura media ambiente [°C]	Temperatura del suelo a 1,5 m de profundidad [°C]	Temperatura del suelo a 3 m de profundidad [°C]	Temperatura del suelo a 0,8 m de profundidad [°C]
1	16,9	11,7	10,6	14,2
2	16,7	11,7	10,6	14,3
3	14,9	11,8	10,6	14,3
4	14,2	11,9	10,6	14,4
5	16,1	11,9	10,6	14,5
6	16,0	12,0	10,6	14,6
7	17,8	12,0	10,6	14,7
8	16,6	12,1	10,7	14,8
9	18,2	12,2	10,7	14,8
10	17,5	12,2	10,7	14,9
11	15,3	12,3	10,7	15,0
12	15,3	12,3	10,7	15,1
13	16,2	12,4	10,7	15,2
14	15,4	12,5	10,7	15,2
15	16,2	12,5	10,8	15,3
16	15,9	12,6	10,8	15,4
17	16,1	12,6	10,8	15,5
18	17,3	12,7	10,8	15,5
19	17,9	12,8	10,8	15,6
20	20,0	12,8	10,9	15,7
21	19,0	12,9	10,9	15,7
22	18,5	12,9	10,9	15,8
23	17,3	13,0	10,9	15,9
24	16,7	13,0	10,9	15,9
25	15,8	13,1	10,9	16,0
26	14,0	13,2	11,0	16,0
27	15,8	13,2	11,0	16,1
28	16,7	13,3	11,0	16,2
29	16,7	13,3	11,0	16,2
30	18,1	13,4	11,0	16,3
31	18,5	13,4	11,1	16,3
32	20,6	13,5	11,1	16,4
33	20,1	13,5	11,1	16,4
34	17,4	13,6	11,1	16,5

35	15,9	13,6	11,1	16,5
36	17,1	13,7	11,2	16,6
37	19,6	13,7	11,2	16,6
38	18,0	13,8	11,2	16,7
39	15,9	13,8	11,2	16,7
40	17,5	13,9	11,3	16,8
41	18,8	13,9	11,3	16,8
42	18,1	14,0	11,3	16,8
43	15,4	14,0	11,3	16,9
44	14,1	14,1	11,3	16,9
45	16,0	14,1	11,4	16,9
46	16,7	14,2	11,4	17,0
47	15,6	14,2	11,4	17,0
48	11,3	14,2	11,4	17,0
49	14,4	14,3	11,5	17,1
50	14,3	14,3	11,5	17,1
51	15,8	14,4	11,5	17,1
52	19,2	14,4	11,5	17,1
53	17,7	14,4	11,5	17,2
54	16,3	14,5	11,6	17,2
55	14,4	14,5	11,6	17,2
56	15,2	14,6	11,6	17,2
57	13,7	14,6	11,6	17,2
58	13,7	14,6	11,7	17,2
59	13,4	14,7	11,7	17,3
60	12,9	14,7	11,7	17,3
61	14,8	14,7	11,7	17,3
62	15,8	14,8	11,8	17,3
63	16,2	14,8	11,8	17,3
64	16,5	14,8	11,8	17,3
65	15,2	14,8	11,8	17,3
66	14,7	14,9	11,8	17,3
67	14,7	14,9	11,9	17,3
68	15,8	14,9	11,9	17,3
69	15,4	14,9	11,9	17,3
70	15,8	15,0	11,9	17,3
71	14,8	15,0	12,0	17,3
72	14,1	15,0	12,0	17,3
73	13,1	15,0	12,0	17,2
74	12,5	15,1	12,0	17,2
75	14,6	15,1	12,0	17,2
76	13,3	15,1	12,1	17,2
77	12,9	15,1	12,1	17,2

78	10,1	15,1	12,1	17,2
79	13,7	15,1	12,1	17,1
80	13,5	15,1	12,2	17,1
81	14,3	15,2	12,2	17,1
82	16,6	15,2	12,2	17,1
83	13,9	15,2	12,2	17,0
84	12,6	15,2	12,2	17,0
85	14,0	15,2	12,3	17,0
86	16,2	15,2	12,3	17,0
87	15,7	15,2	12,3	16,9
88	14,1	15,2	12,3	16,9
89	14,0	15,2	12,3	16,8
90	14,3	15,2	12,4	16,8
91	11,0	15,2	12,4	16,8
92	10,6	15,2	12,4	16,7
93	11,4	15,2	12,4	16,7
94	10,7	15,2	12,4	16,6
95	9,5	15,2	12,5	16,6
96	10,2	15,2	12,5	16,5
97	12,4	15,2	12,5	16,5
98	11,2	15,2	12,5	16,4
99	9,2	15,2	12,5	16,4
100	10,6	15,2	12,5	16,3
101	10,6	15,2	12,6	16,3
102	12,8	15,2	12,6	16,2
103	11,2	15,2	12,6	16,2
104	12,7	15,2	12,6	16,1
105	14,2	15,1	12,6	16,1
106	13,1	15,1	12,6	16,0
107	8,5	15,1	12,7	15,9
108	8,0	15,1	12,7	15,9
109	7,1	15,1	12,7	15,8
110	10,0	15,1	12,7	15,7
111	13,0	15,0	12,7	15,7
112	10,6	15,0	12,7	15,6
113	9,4	15,0	12,7	15,5
114	8,4	15,0	12,8	15,5
115	9,5	15,0	12,8	15,4
116	7,2	14,9	12,8	15,3
117	8,3	14,9	12,8	15,2
118	8,3	14,9	12,8	15,2
119	9,5	14,9	12,8	15,1
120	12,3	14,8	12,8	15,0

121	8,4	14,8	12,8	14,9
122	11,4	14,8	12,8	14,8
123	13,6	14,7	12,9	14,8
124	10,8	14,7	12,9	14,7
125	12,6	14,7	12,9	14,6
126	11,4	14,6	12,9	14,5
127	13,1	14,6	12,9	14,4
128	11,3	14,6	12,9	14,4
129	11,8	14,5	12,9	14,3
130	9,5	14,5	12,9	14,2
131	9,9	14,5	12,9	14,1
132	12,5	14,4	12,9	14,0
133	14,1	14,4	12,9	13,9
134	11,0	14,3	12,9	13,8
135	10,2	14,3	13,0	13,7
136	11,0	14,3	13,0	13,7
137	10,5	14,2	13,0	13,6
138	8,2	14,2	13,0	13,5
139	7,5	14,1	13,0	13,4
140	7,5	14,1	13,0	13,3
141	9,4	14,0	13,0	13,2
142	7,3	14,0	13,0	13,1
143	4,4	14,0	13,0	13,0
144	7,9	13,9	13,0	12,9
145	9,4	13,9	13,0	12,8
146	12,9	13,8	13,0	12,7
147	11,9	13,8	13,0	12,6
148	7,4	13,7	13,0	12,5
149	6,4	13,7	13,0	12,4
150	11,5	13,6	13,0	12,3
151	10,0	13,6	13,0	12,2
152	9,3	13,5	13,0	12,1
153	7,1	13,5	13,0	12,1
154	6,9	13,4	13,0	12,0
155	7,3	13,3	13,0	11,9
156	7,7	13,3	13,0	11,8
157	6,8	13,2	13,0	11,7
158	9,0	13,2	13,0	11,6
159	9,9	13,1	13,0	11,5
160	9,5	13,1	13,0	11,4
161	8,0	13,0	13,0	11,3
162	5,7	13,0	13,0	11,2
163	5,2	12,9	13,0	11,1

164	5,9	12,8	13,0	11,0
165	9,9	12,8	12,9	10,9
166	6,2	12,7	12,9	10,8
167	8,6	12,7	12,9	10,7
168	7,1	12,6	12,9	10,6
169	8,4	12,6	12,9	10,5
170	8,7	12,5	12,9	10,4
171	6,5	12,4	12,9	10,3
172	5,5	12,4	12,9	10,2
173	8,6	12,3	12,9	10,1
174	6,3	12,3	12,9	10,0
175	7,5	12,2	12,9	10,0
176	5,5	12,1	12,9	9,9
177	7,0	12,1	12,8	9,8
178	6,1	12,0	12,8	9,7
179	4,9	12,0	12,8	9,6
180	3,9	11,9	12,8	9,5
181	8,1	11,8	12,8	9,4
182	4,2	11,8	12,8	9,3
183	2,7	11,7	12,8	9,2
184	2,8	11,6	12,8	9,1
185	1,6	11,6	12,8	9,1
186	4,8	11,5	12,7	9,0
187	7,2	11,5	12,7	8,9
188	8,4	11,4	12,7	8,8
189	10,9	11,3	12,7	8,7
190	10,7	11,3	12,7	8,6
191	11,0	11,2	12,7	8,6
192	10,0	11,2	12,7	8,5
193	8,9	11,1	12,6	8,4
194	8,5	11,0	12,6	8,3
195	7,0	11,0	12,6	8,2
196	7,5	10,9	12,6	8,2
197	5,9	10,9	12,6	8,1
198	4,7	10,8	12,6	8,0
199	8,7	10,7	12,5	7,9
200	9,0	10,7	12,5	7,9
201	6,6	10,6	12,5	7,8
202	9,5	10,6	12,5	7,7
203	3,8	10,5	12,5	7,7
204	6,0	10,4	12,5	7,6
205	3,1	10,4	12,4	7,5
206	4,6	10,3	12,4	7,5

207	6,8	10,3	12,4	7,4
208	6,6	10,2	12,4	7,3
209	8,4	10,2	12,4	7,3
210	10,5	10,1	12,3	7,2
211	9,1	10,1	12,3	7,2
212	9,2	10,0	12,3	7,1
213	9,1	9,9	12,3	7,0
214	8,3	9,9	12,3	7,0
215	5,6	9,8	12,2	6,9
216	10,0	9,8	12,2	6,9
217	9,5	9,7	12,2	6,8
218	8,7	9,7	12,2	6,8
219	10,8	9,6	12,2	6,7
220	11,6	9,6	12,1	6,7
221	9,2	9,5	12,1	6,6
222	7,2	9,5	12,1	6,6
223	7,3	9,4	12,1	6,6
224	9,1	9,4	12,0	6,5
225	7,3	9,3	12,0	6,5
226	8,8	9,3	12,0	6,4
227	10,5	9,3	12,0	6,4
228	9,8	9,2	12,0	6,4
229	10,2	9,2	11,9	6,3
230	8,3	9,1	11,9	6,3
231	8,3	9,1	11,9	6,3
232	7,1	9,0	11,9	6,3
233	4,0	9,0	11,8	6,2
234	5,3	9,0	11,8	6,2
235	10,7	8,9	11,8	6,2
236	10,6	8,9	11,8	6,2
237	10,7	8,8	11,8	6,1
238	10,6	8,8	11,7	6,1
239	7,7	8,8	11,7	6,1
240	5,0	8,7	11,7	6,1
241	9,3	8,7	11,7	6,1
242	10,6	8,7	11,6	6,1
243	9,7	8,6	11,6	6,1
244	6,7	8,6	11,6	6,0
245	4,7	8,6	11,6	6,0
246	7,7	8,5	11,5	6,0
247	9,0	8,5	11,5	6,0
248	8,2	8,5	11,5	6,0
249	7,7	8,5	11,5	6,0

250	8,1	8,4	11,5	6,0
251	10,4	8,4	11,4	6,0
252	10,6	8,4	11,4	6,0
253	10,1	8,4	11,4	6,0
254	8,1	8,3	11,4	6,1
255	9,3	8,3	11,3	6,1
256	11,0	8,3	11,3	6,1
257	9,4	8,3	11,3	6,1
258	7,2	8,3	11,3	6,1
259	8,6	8,2	11,3	6,1
260	10,5	8,2	11,2	6,1
261	11,9	8,2	11,2	6,2
262	10,3	8,2	11,2	6,2
263	10,1	8,2	11,2	6,2
264	11,6	8,2	11,1	6,2
265	10,1	8,2	11,1	6,3
266	8,9	8,1	11,1	6,3
267	10,7	8,1	11,1	6,3
268	9,7	8,1	11,1	6,3
269	9,6	8,1	11,0	6,4
270	9,7	8,1	11,0	6,4
271	11,5	8,1	11,0	6,4
272	11,1	8,1	11,0	6,5
273	13,2	8,1	11,0	6,5
274	12,0	8,1	10,9	6,6
275	10,3	8,1	10,9	6,6
276	10,8	8,1	10,9	6,6
277	10,2	8,1	10,9	6,7
278	9,3	8,1	10,9	6,7
279	8,4	8,1	10,9	6,8
280	10,8	8,1	10,8	6,8
281	9,5	8,1	10,8	6,9
282	8,5	8,1	10,8	6,9
283	8,4	8,1	10,8	7,0
284	9,6	8,1	10,8	7,0
285	11,7	8,2	10,7	7,1
286	10,9	8,2	10,7	7,2
287	9,1	8,2	10,7	7,2
288	8,5	8,2	10,7	7,3
289	8,3	8,2	10,7	7,3
290	8,7	8,2	10,7	7,4
291	10,2	8,2	10,7	7,5
292	11,0	8,2	10,6	7,5

293	13,1	8,3	10,6	7,6
294	14,2	8,3	10,6	7,7
295	13,5	8,3	10,6	7,7
296	13,2	8,3	10,6	7,8
297	13,3	8,3	10,6	7,9
298	14,2	8,4	10,6	7,9
299	13,1	8,4	10,5	8,0
300	13,5	8,4	10,5	8,1
301	15,3	8,4	10,5	8,2
302	13,4	8,5	10,5	8,2
303	13,0	8,5	10,5	8,3
304	10,2	8,5	10,5	8,4
305	9,4	8,6	10,5	8,5
306	8,4	8,6	10,5	8,6
307	10,2	8,6	10,5	8,6
308	14,5	8,6	10,4	8,7
309	16,0	8,7	10,4	8,8
310	15,3	8,7	10,4	8,9
311	13,8	8,8	10,4	9,0
312	11,1	8,8	10,4	9,1
313	11,7	8,8	10,4	9,1
314	11,3	8,9	10,4	9,2
315	11,5	8,9	10,4	9,3
316	11,6	8,9	10,4	9,4
317	11,4	9,0	10,4	9,5
318	12,1	9,0	10,4	9,6
319	13,3	9,1	10,4	9,7
320	10,5	9,1	10,4	9,8
321	10,2	9,1	10,4	9,9
322	12,3	9,2	10,4	9,9
323	14,5	9,2	10,3	10,0
324	14,0	9,3	10,3	10,1
325	15,3	9,3	10,3	10,2
326	19,2	9,4	10,3	10,3
327	19,6	9,4	10,3	10,4
328	15,9	9,5	10,3	10,5
329	16,5	9,5	10,3	10,6
330	14,5	9,6	10,3	10,7
331	14,9	9,6	10,3	10,8
332	13,9	9,7	10,3	10,9
333	14,4	9,7	10,3	11,0
334	16,3	9,8	10,3	11,1
335	17,7	9,8	10,3	11,2

336	16,4	9,9	10,3	11,3
337	15,9	9,9	10,3	11,4
338	16,8	10,0	10,3	11,5
339	13,1	10,0	10,3	11,6
340	12,2	10,1	10,3	11,7
341	13,0	10,1	10,3	11,8
342	14,9	10,2	10,3	11,9
343	16,2	10,3	10,4	11,9
344	15,4	10,3	10,4	12,0
345	17,2	10,4	10,4	12,1
346	15,8	10,4	10,4	12,2
347	13,2	10,5	10,4	12,3
348	11,8	10,5	10,4	12,4
349	14,4	10,6	10,4	12,5
350	17,8	10,7	10,4	12,6
351	14,3	10,7	10,4	12,7
352	15,4	10,8	10,4	12,8
353	14,4	10,8	10,4	12,9
354	14,4	10,9	10,4	13,0
355	14,1	10,9	10,4	13,1
356	12,9	11,0	10,4	13,2
357	11,9	11,1	10,4	13,3
358	13,7	11,1	10,5	13,4
359	13,6	11,2	10,5	13,5
360	14,0	11,3	10,5	13,6
361	13,9	11,3	10,5	13,6
362	15,6	11,4	10,5	13,7
363	19,0	11,4	10,5	13,8
364	18,6	11,5	10,5	13,9
365	16,4	11,6	10,5	14,0
366	15,8	11,6	10,5	14,1

Anexo 7: Estratigrafía de pozos profundos.

A continuación, se presenta la información estratigráfica de pozos profundos graficadas en columnas estratigráficas. Cabe a lugar mencionar que la ubicación de las columnas corresponde a coordenadas UTM WGS84. La leyenda de correspondiente a cada nivel estratigráfico se encuentra en la figura 68. Se debe tener en cuenta que los perfiles estratigráficos miden profundidad en metros considerando como rango entre “desde” y “hasta”.

LEYENDA

	ARCILLA		ARENA GRAVOARCILLOSA
	ARCILLA ARENOSA		ARENA GRAVOSA
	ARCILLA GRAVOSA		GRAVA
	ARENA		GRAVA ARCILLOARENOSA
	ARENA ARCILLOGRAVOSA		GRAVA ARCILLOSA
	ARENA ARCILLOSA		GRAVA ARENOSA

SIMBOLOGÍA

	CRIBA		TUBERÍA CIEGA
	NIVEL ESTÁTICO		

Figura 68: Leyenda de estratigrafía de pozos profundos publicados por la DGA y ubicación de cribas.

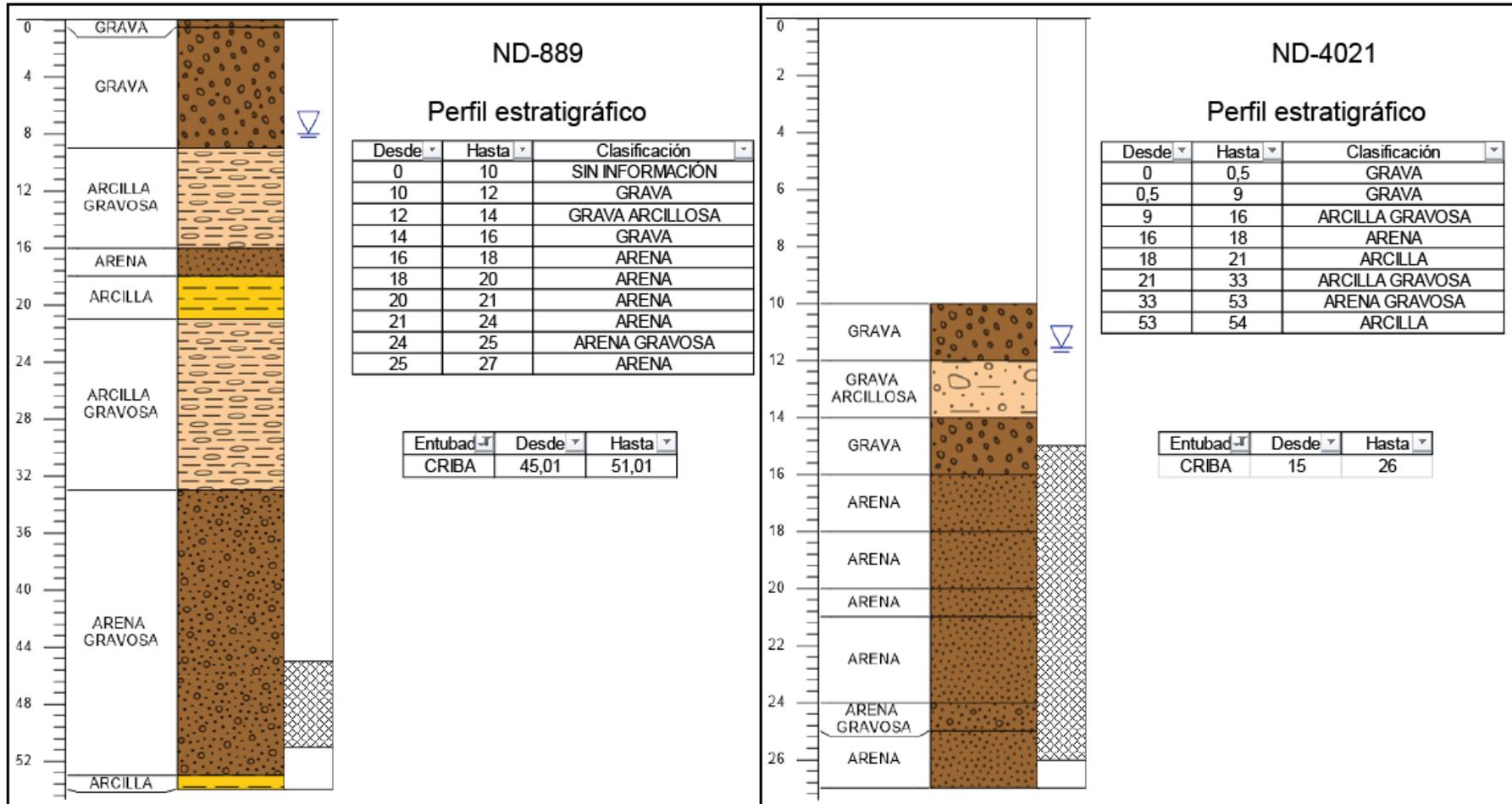


Figura 69: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-889: 5506055 [m] S, 661084 [m] E, 56 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-4021: 5504645 [m] S, 661889 [m] E, 70 [m.s.n.m].

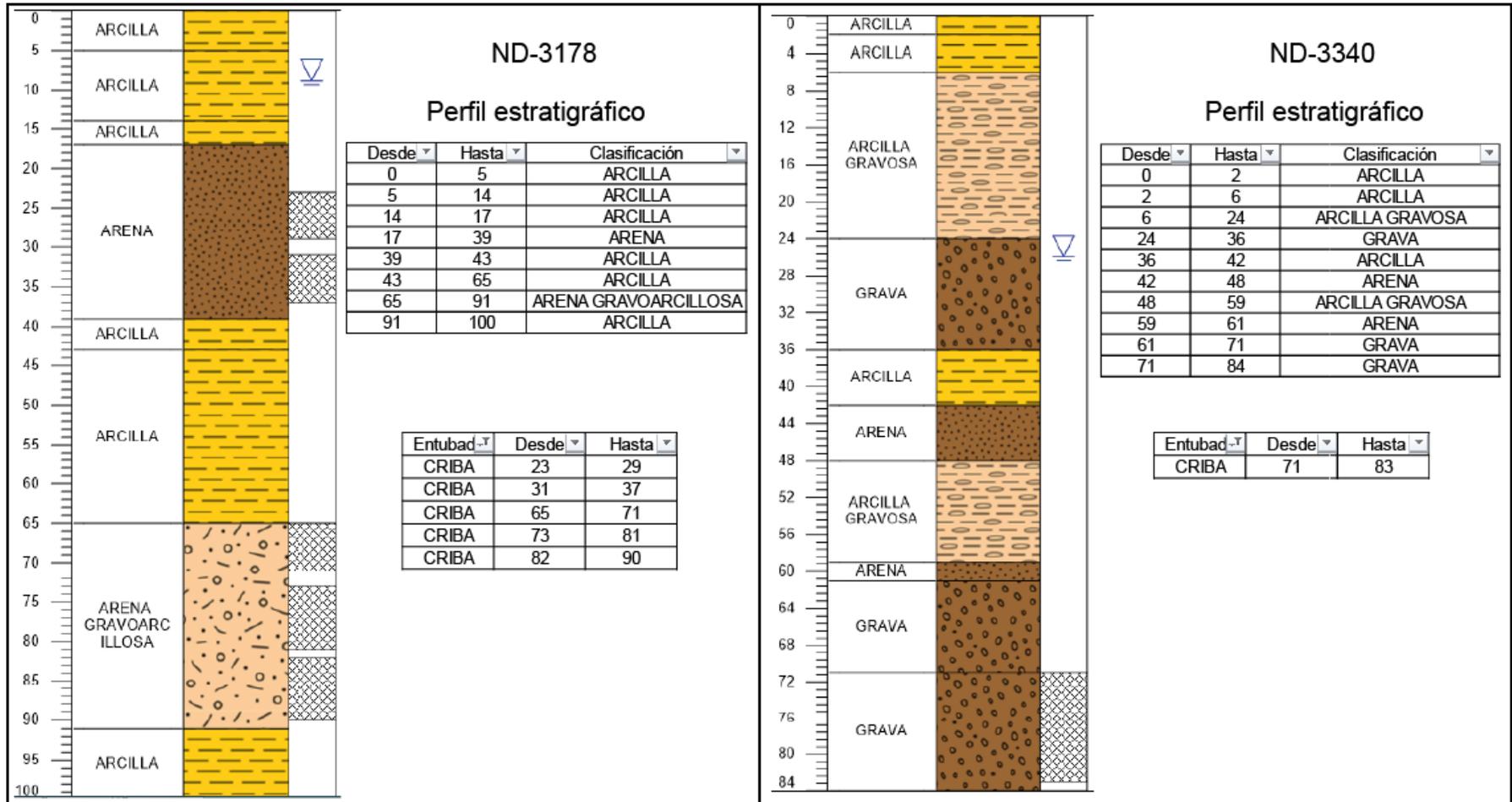


Figura 70: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3178: 5505395 [m] S, 655978 [m] E, 41 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-3340: 5507833 [m] S, 656901 [m] E, 65 [m.s.n.m].

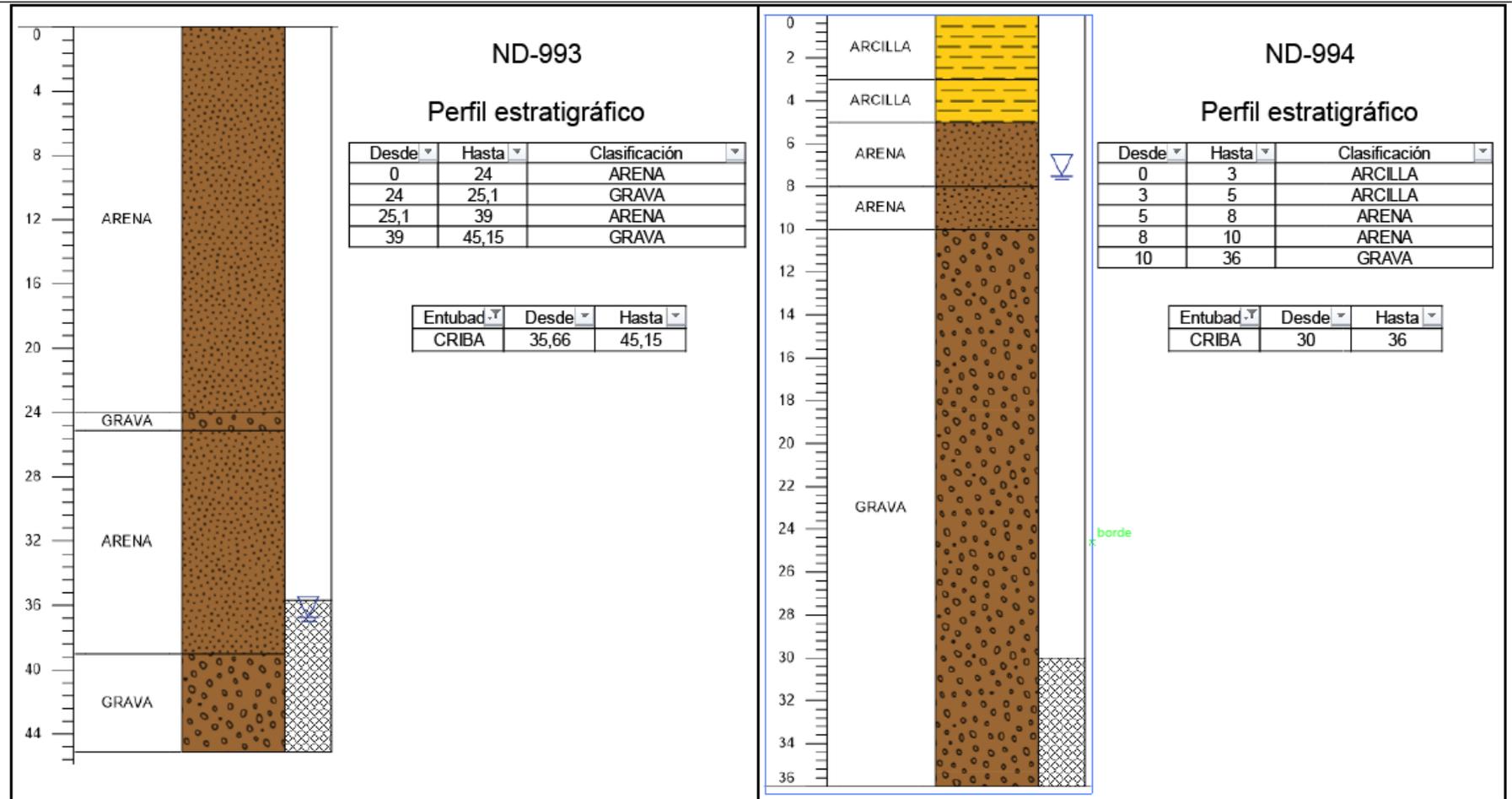


Figura 71: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-993: 5511016 [m] S, 656799 [m] E, 70 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-994: 5504218 [m] S, 663061 [m] E, 68 [m.s.n.m].

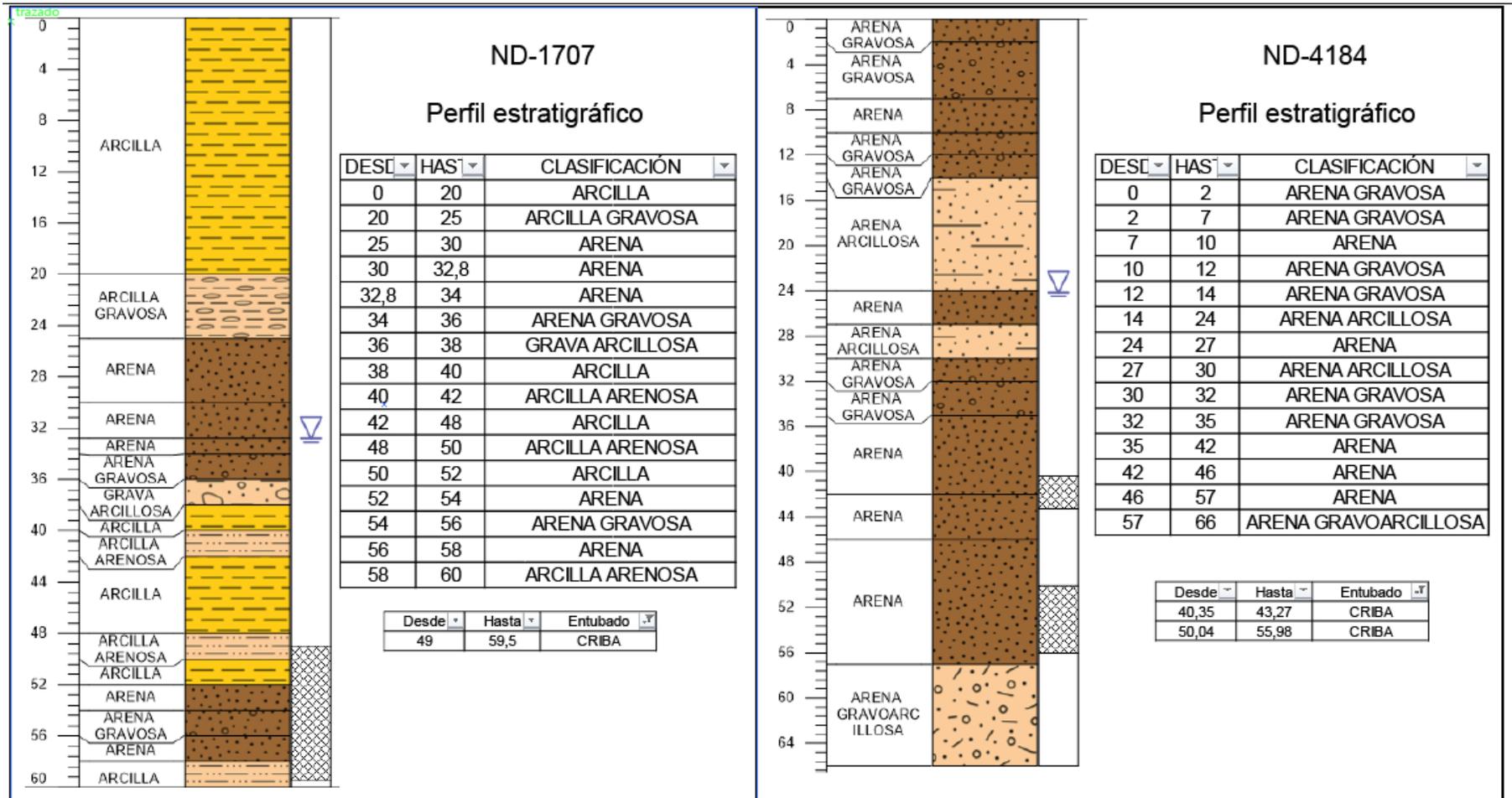


Figura 72: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-1707: 5507674 [m] S, 660666 [m] E, 99 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-4184: 5506491 [m] S, 661093 [m] E, 57 [m.s.n.m].

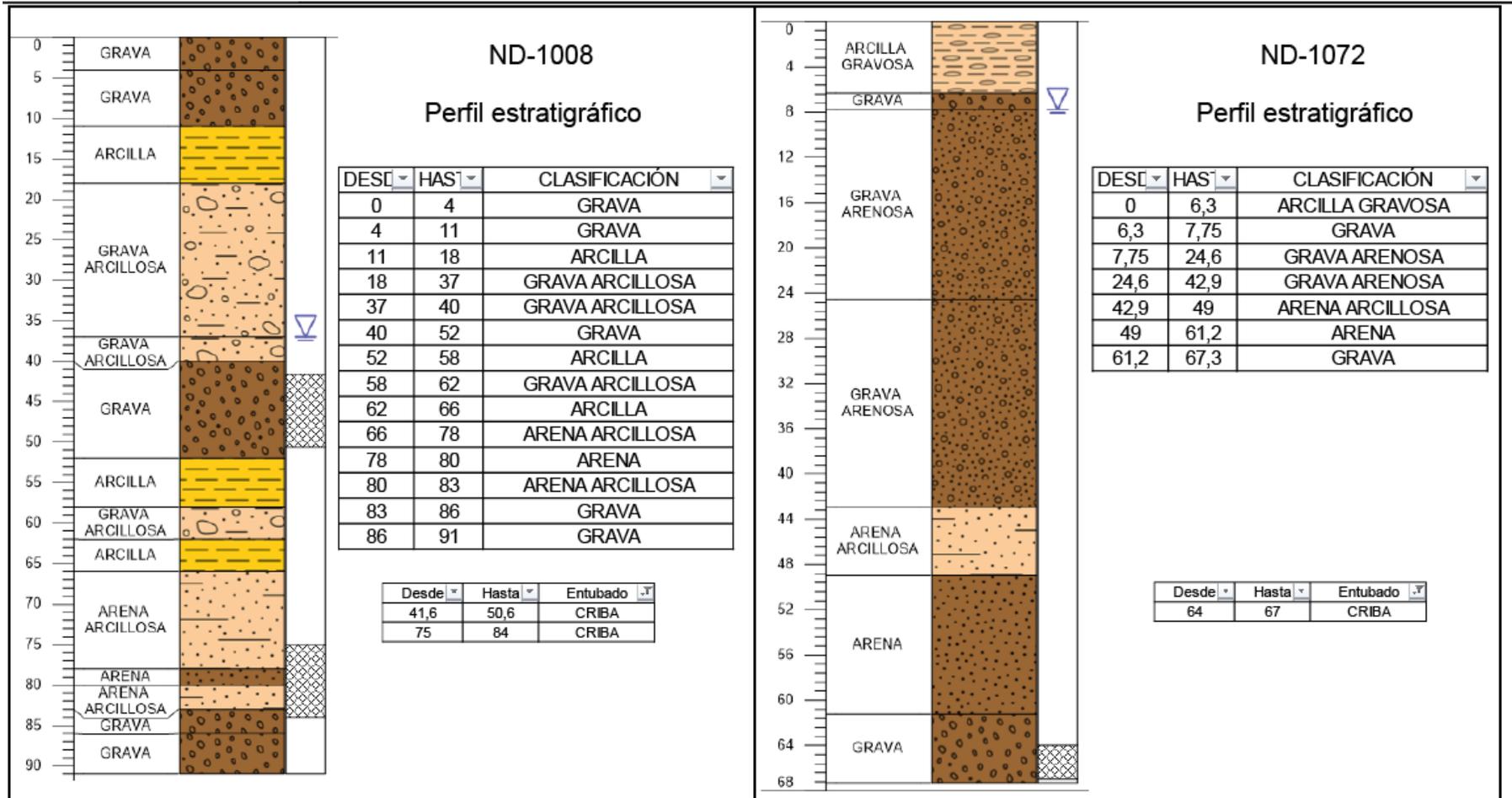


Figura 73: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-1008: 5511243 [m] S, 658057 [m] E, 81 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-1072: 5503720 [m] S, 662756 [m] E, 68 [m.s.n.m].

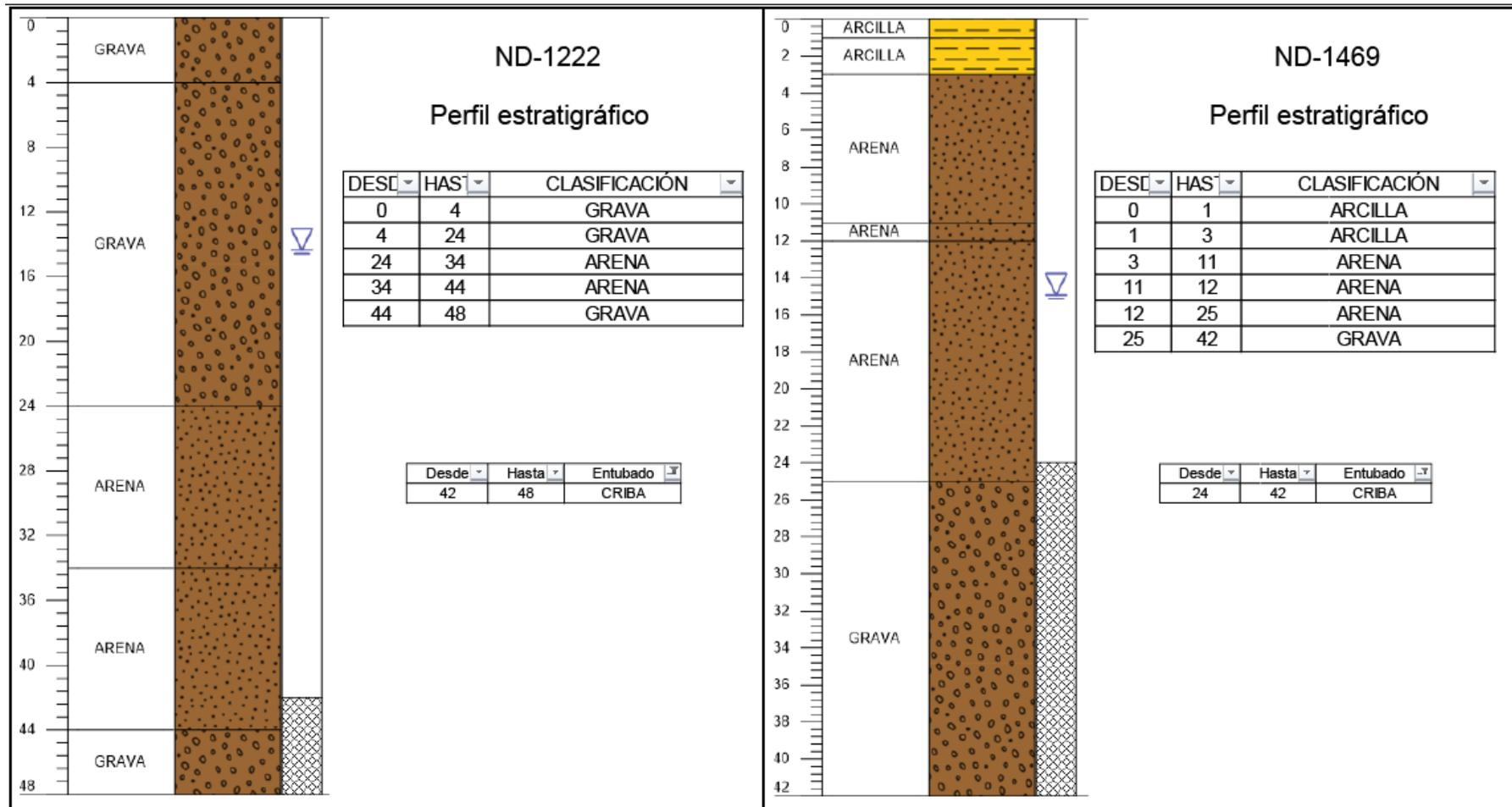


Figura 74: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-1222: 5505412 [m] S, 661189 [m] E, 50 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-1469: 5501724 [m] S, 665707 [m] E, 83 [m.s.n.m].

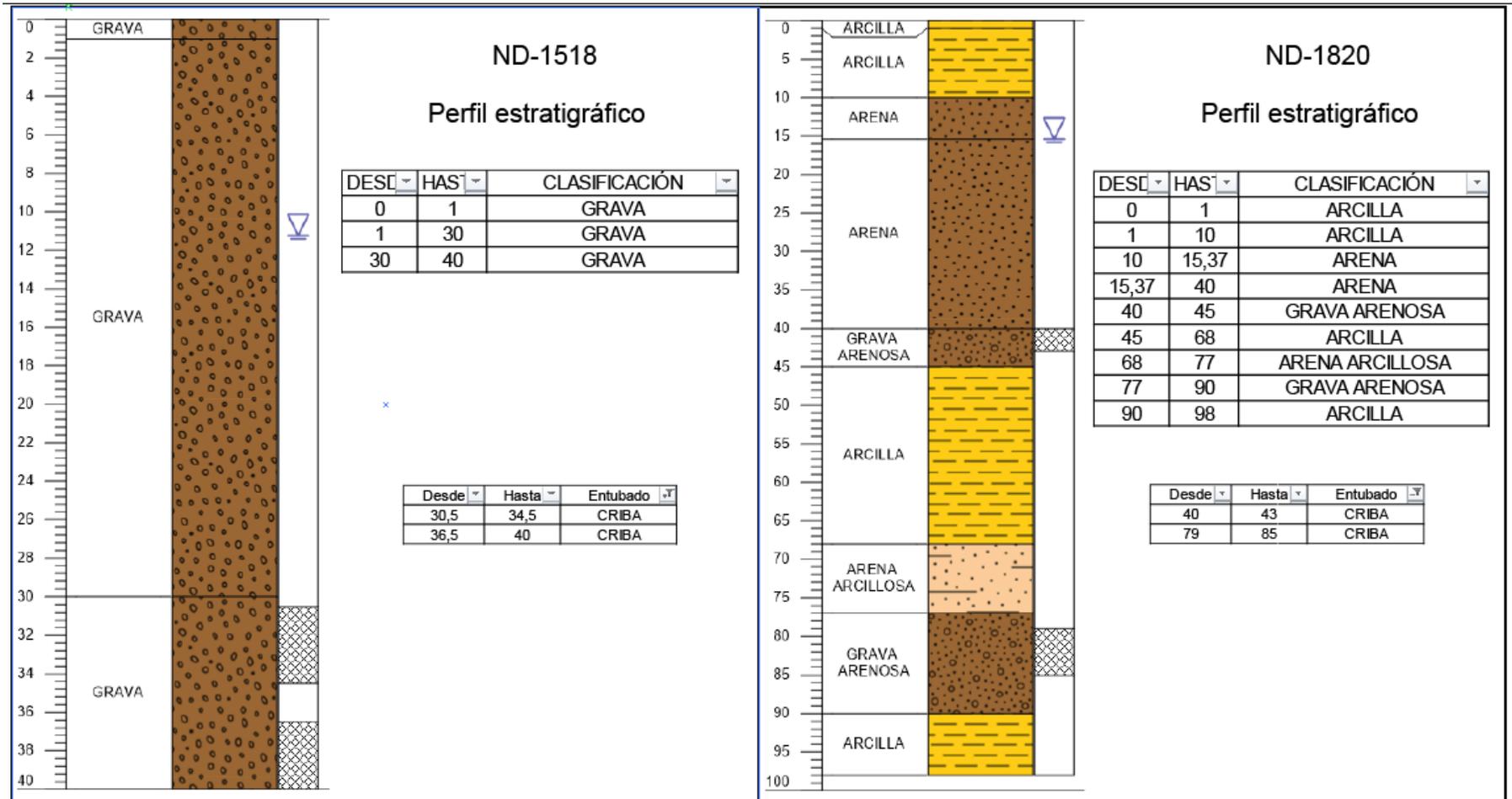


Figura 75: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-1518: 5502242 [m] S, 666093 [m] E, 89 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-1820: 5502619 [m] S, 666595 [m] E, 95 [m.s.n.m].

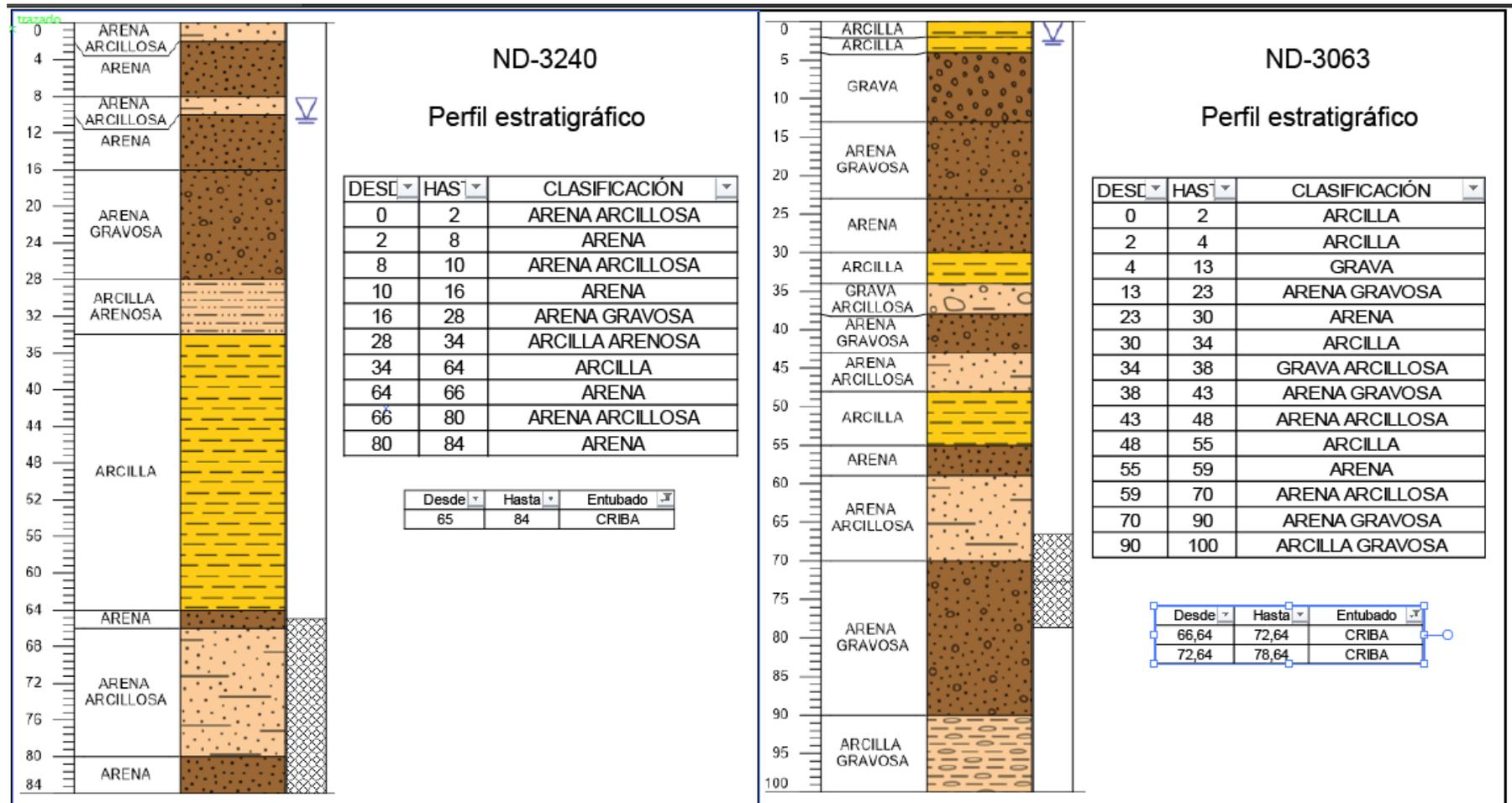


Figura 76: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3240: 5502850 [m] S, 658860 [m] E, 79 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-3063: 5503454 [m] S, 663559 [m] E, 77 [m.s.n.m].

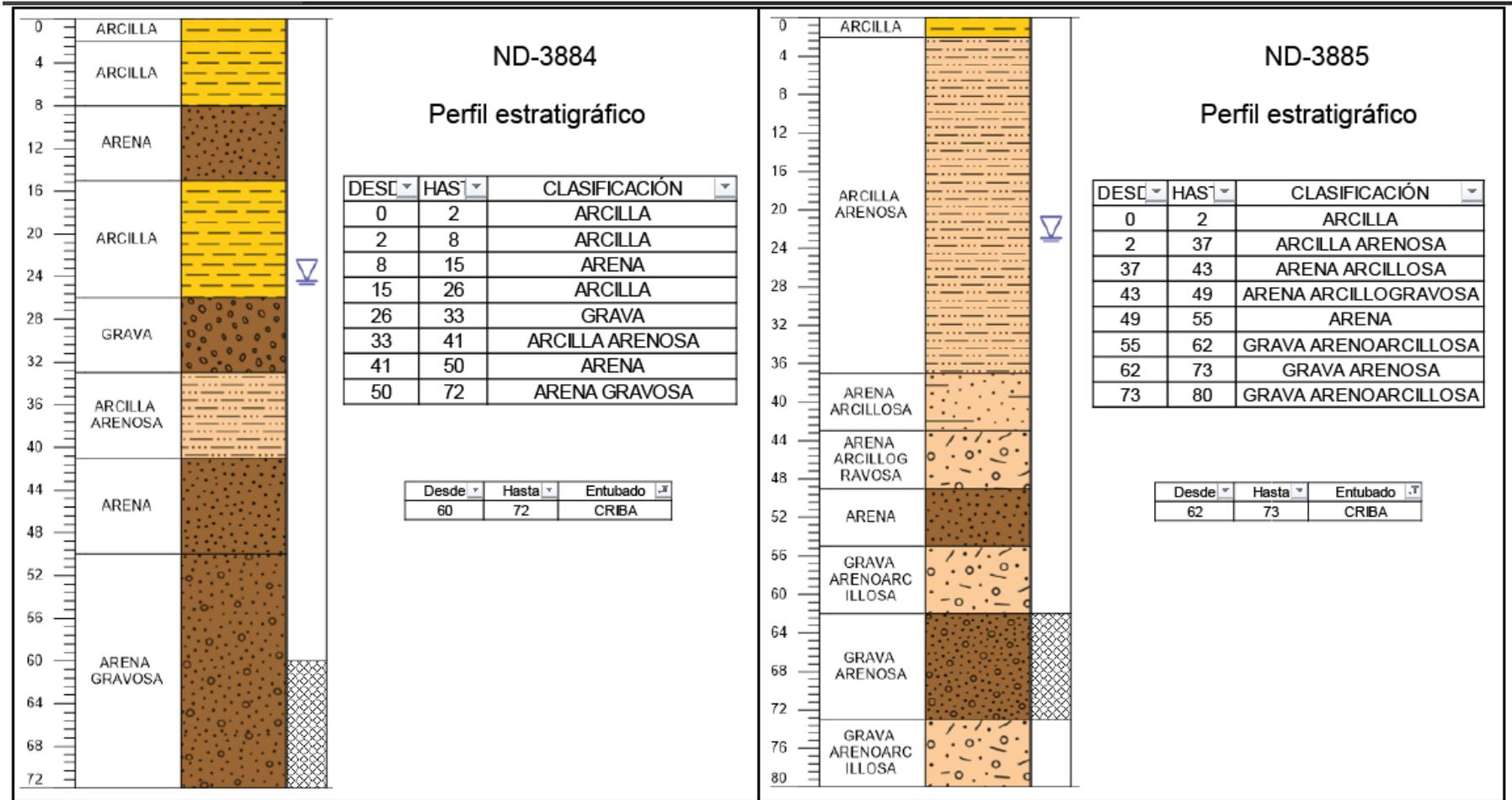


Figura 77: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3884: 5505746 [m] S, 659093 [m] E, 67 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-3885: 5505846 [m] S, 659140 [m] E, 68 [m.s.n.m].

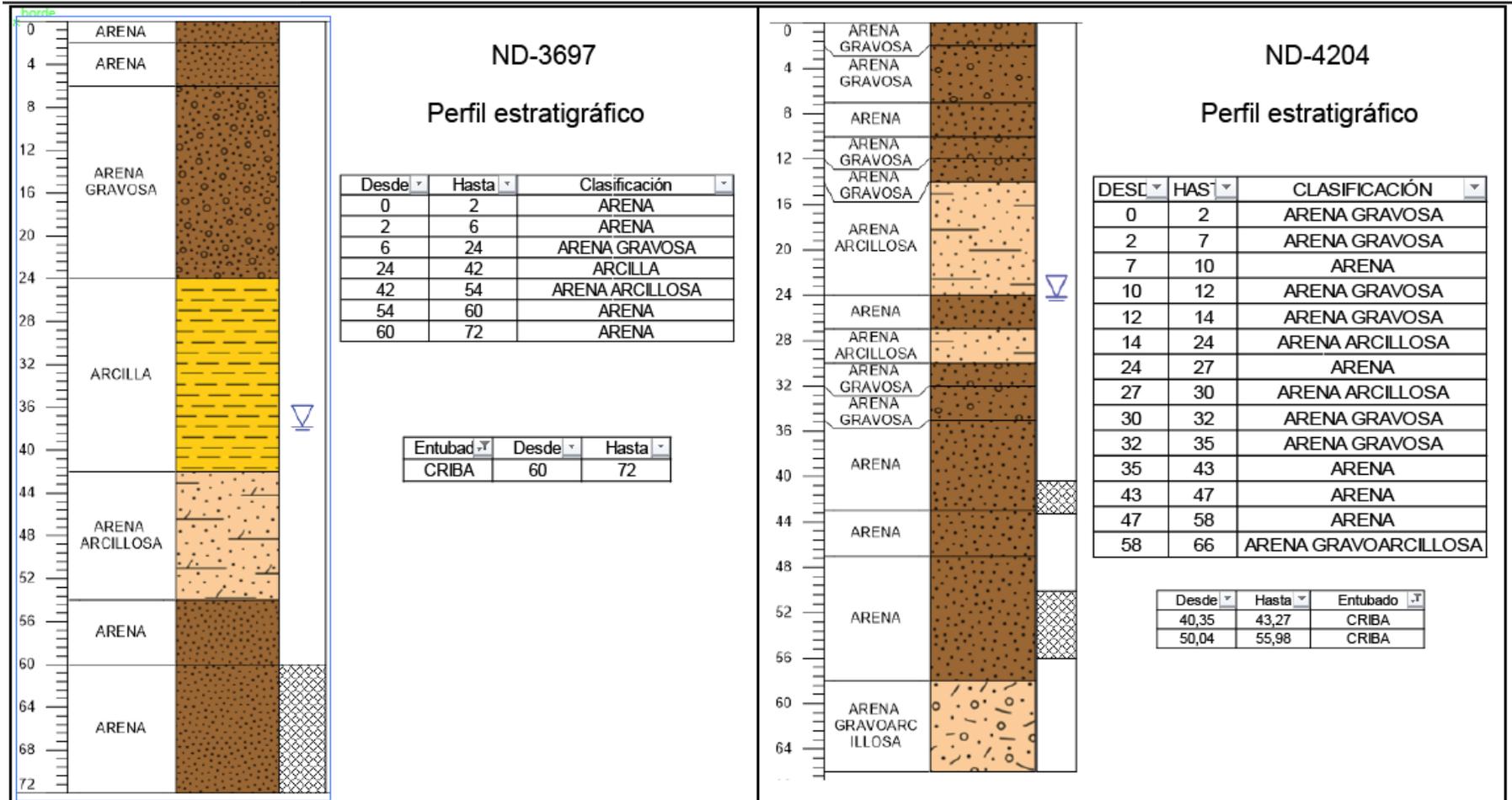


Figura 78: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3697: 5498670 [m] S, 656501 [m] E, 90 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-4204: 5506546 [m] S, 660855 [m] E, 50 [m.s.n.m].

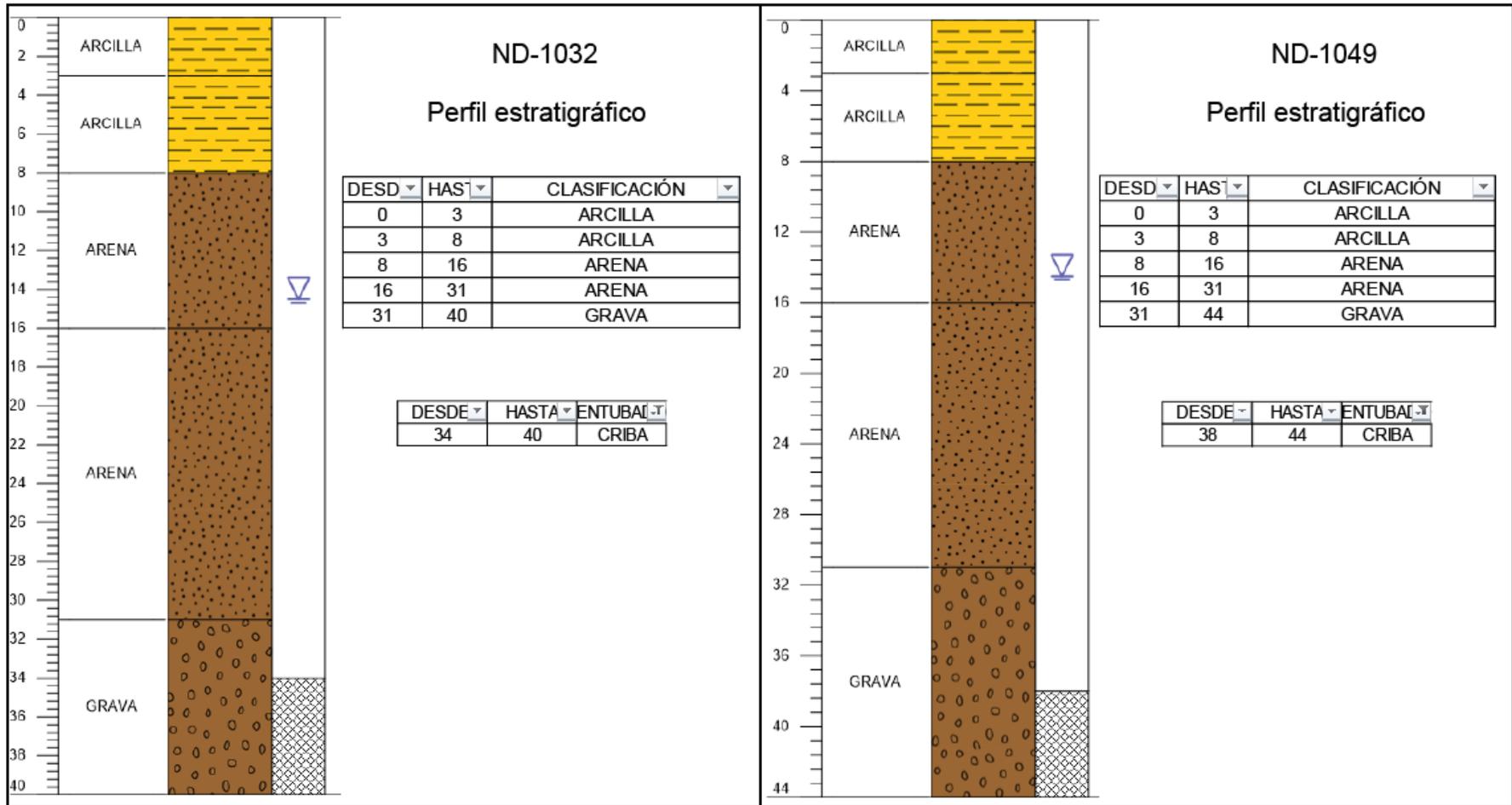


Figura 79: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-1032: 5508721 [m] S, 660455 [m] E, 84 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-1049: 5502794 [m] S, 667280 [m] E, 105 [m.s.n.m].

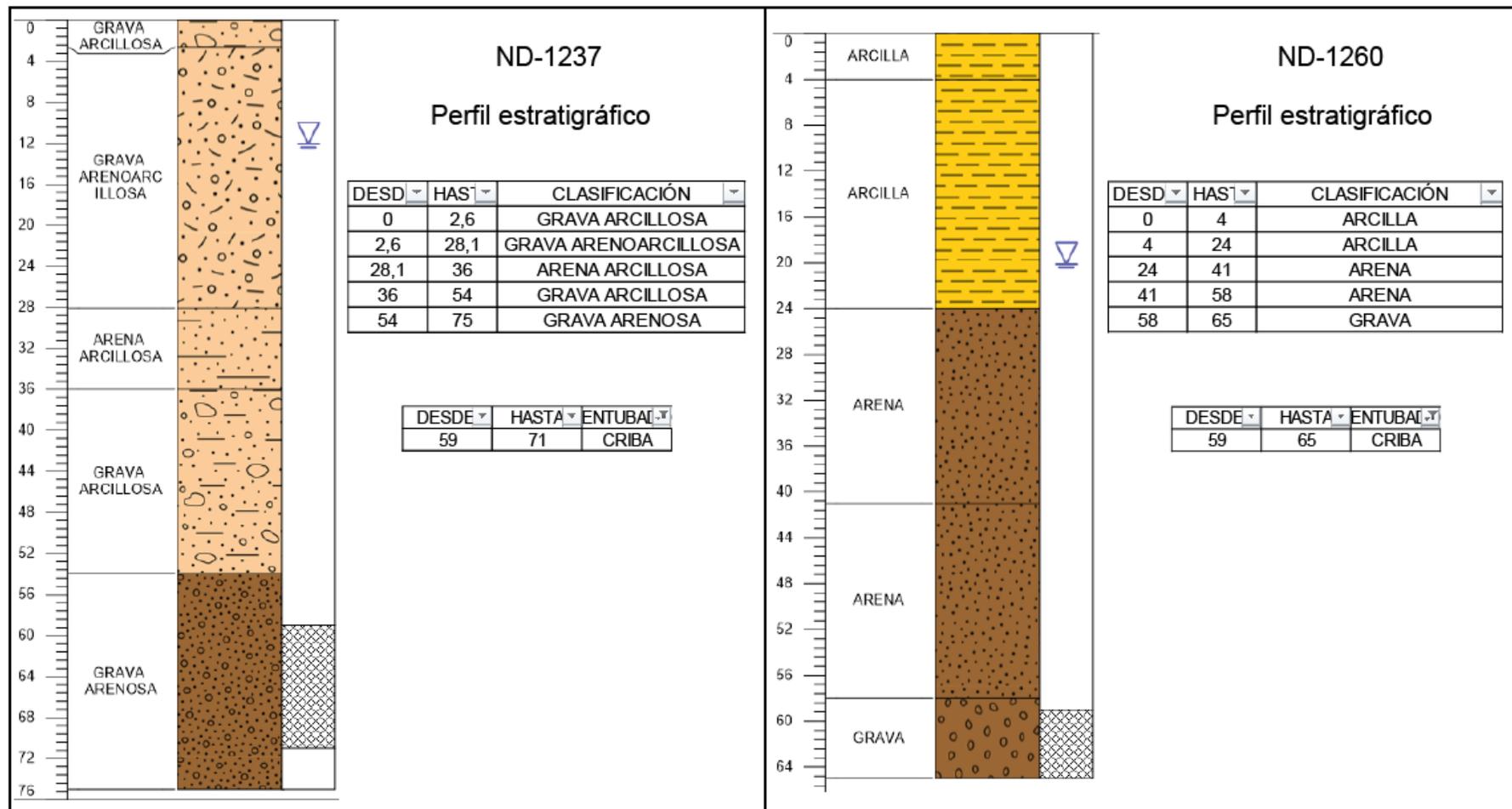


Figura 80: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-1237: 5508116 [m] S, 658683 [m] E, 64 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-1260: 5516745 [m] S, 666119 [m] E, 106 [m.s.n.m].

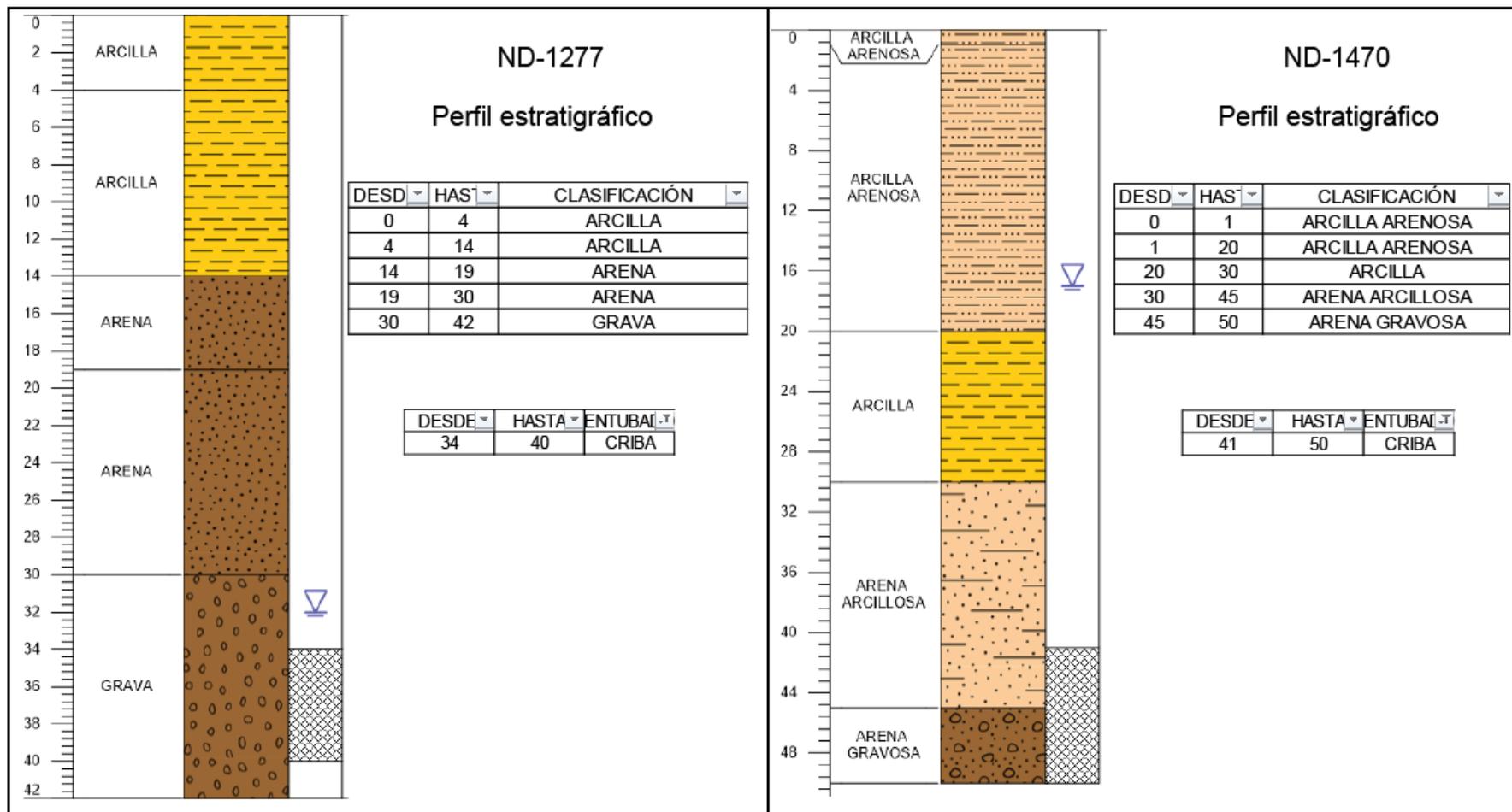


Figura 81: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-1277: 5509253 [m] S, 660793 [m] E, 91 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-1470: 5503315 [m] S, 665348 [m] E, 101 [m.s.n.m].

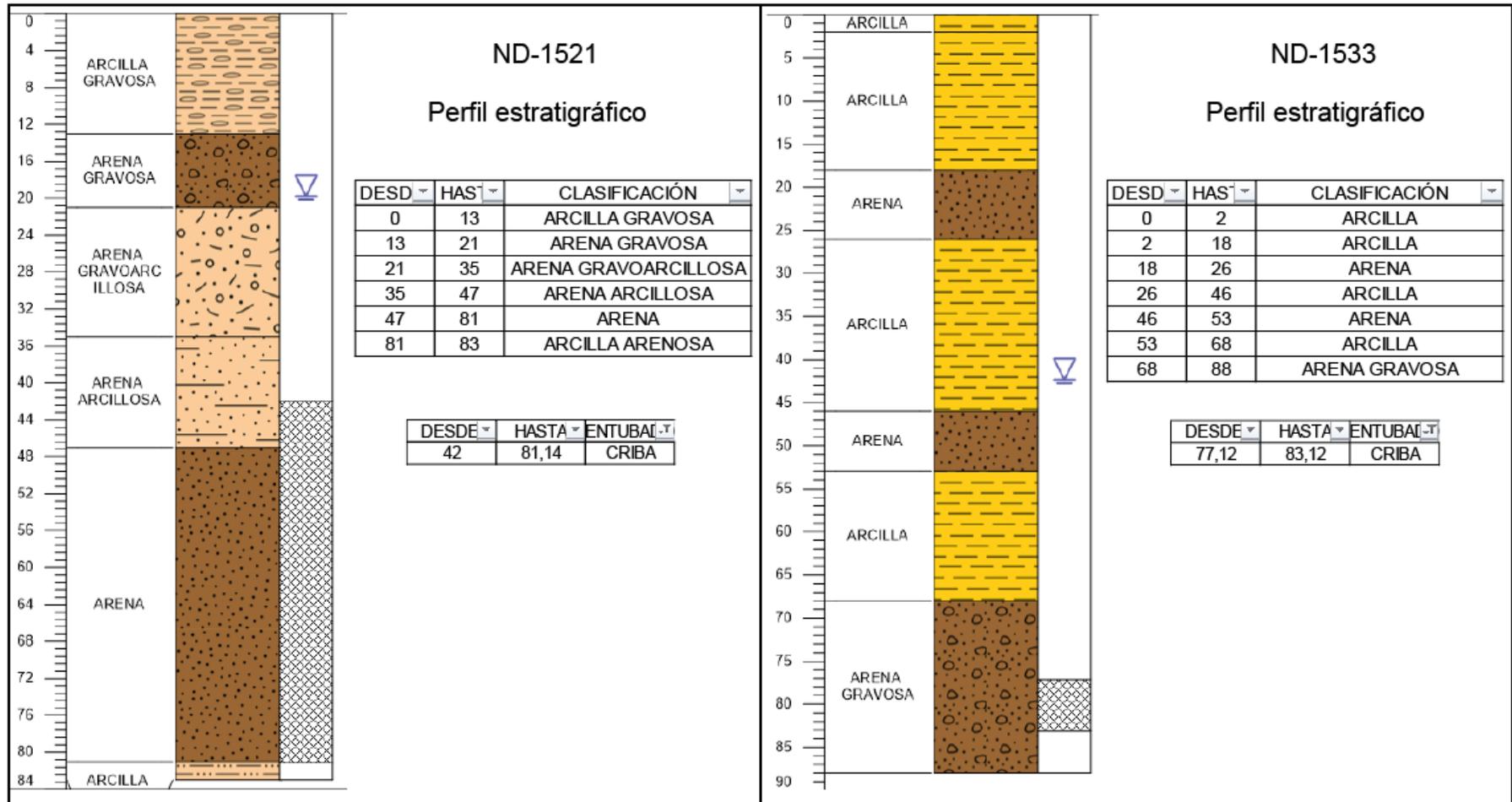


Figura 82: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-1521: 5507215 [m] S, 663897 [m] E, 97 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-1533: 5501928 [m] S, 651632 [m] E, 115 [m.s.n.m].

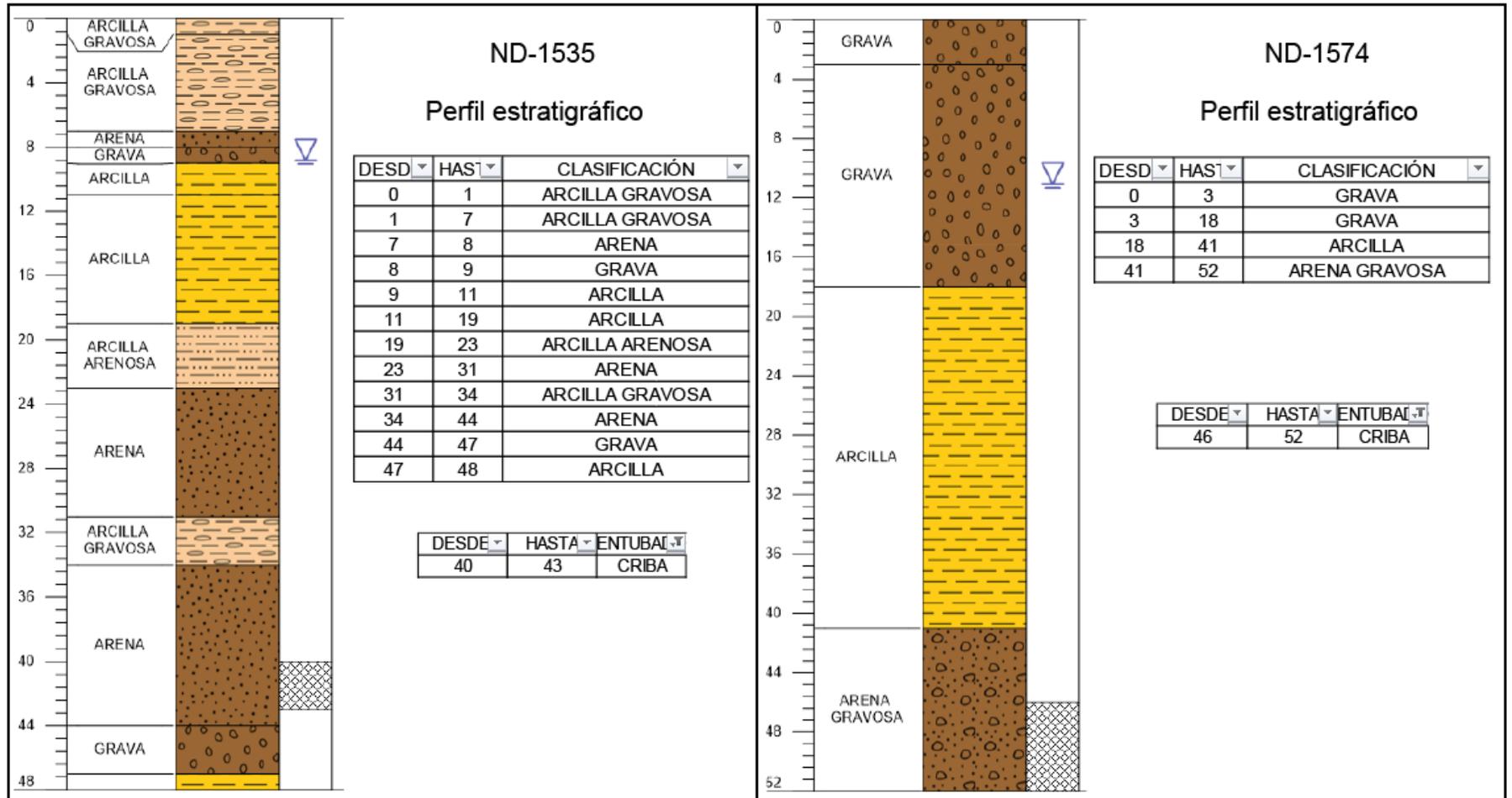


Figura 83: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-1535: 5503417 [m] S, 666078 [m] E, 97 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-1574: 5499438 [m] S, 659347 [m] E, 96 [m.s.n.m].

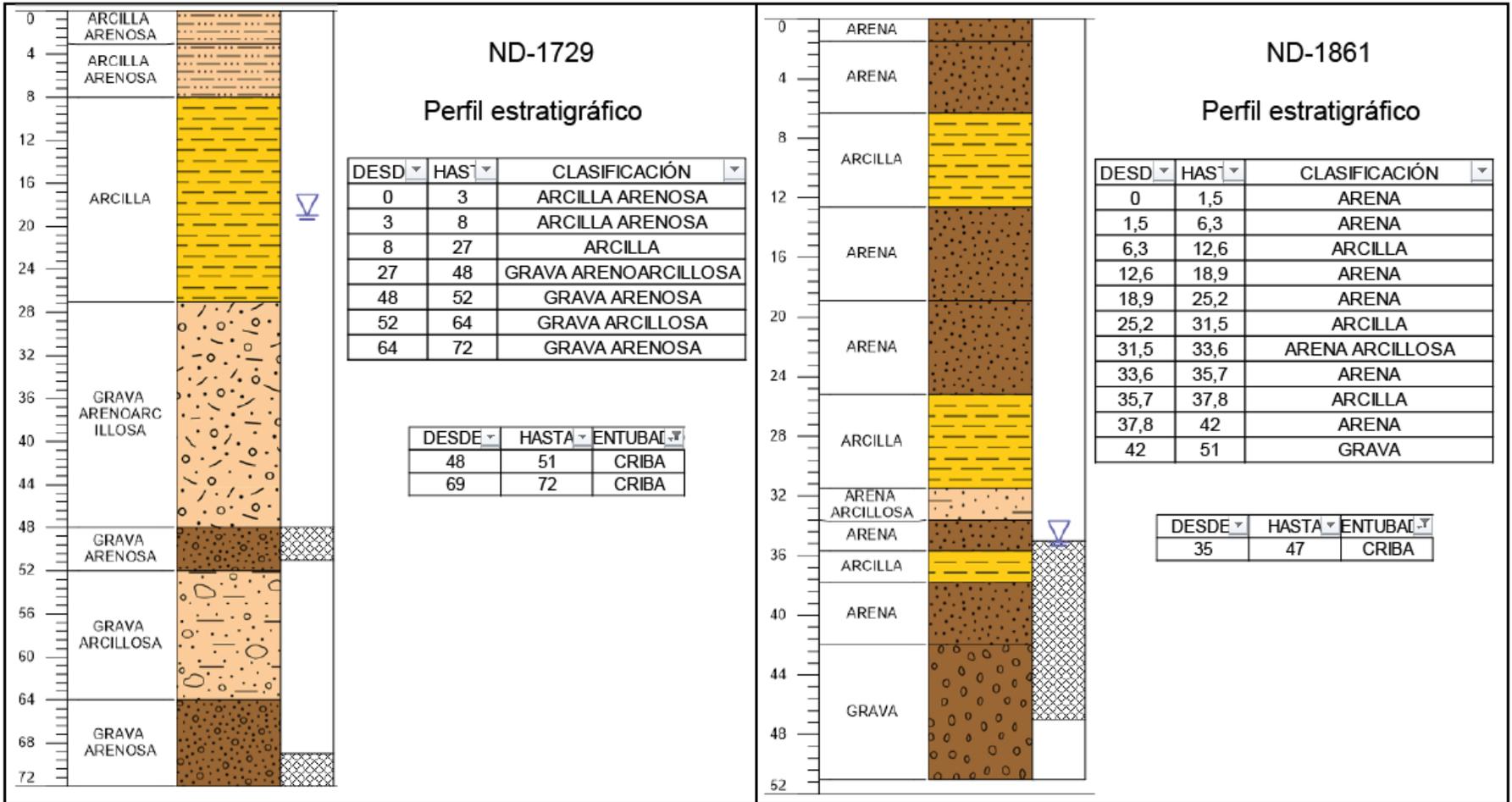


Figura 84: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-1729: 5517259 [m] S, 666562 [m] E, 105 [m.s.n.m.]. b) Coordenadas ND-1861: 5509287 [m] S, 661040 [m] E, 90 [m.s.n.m.].

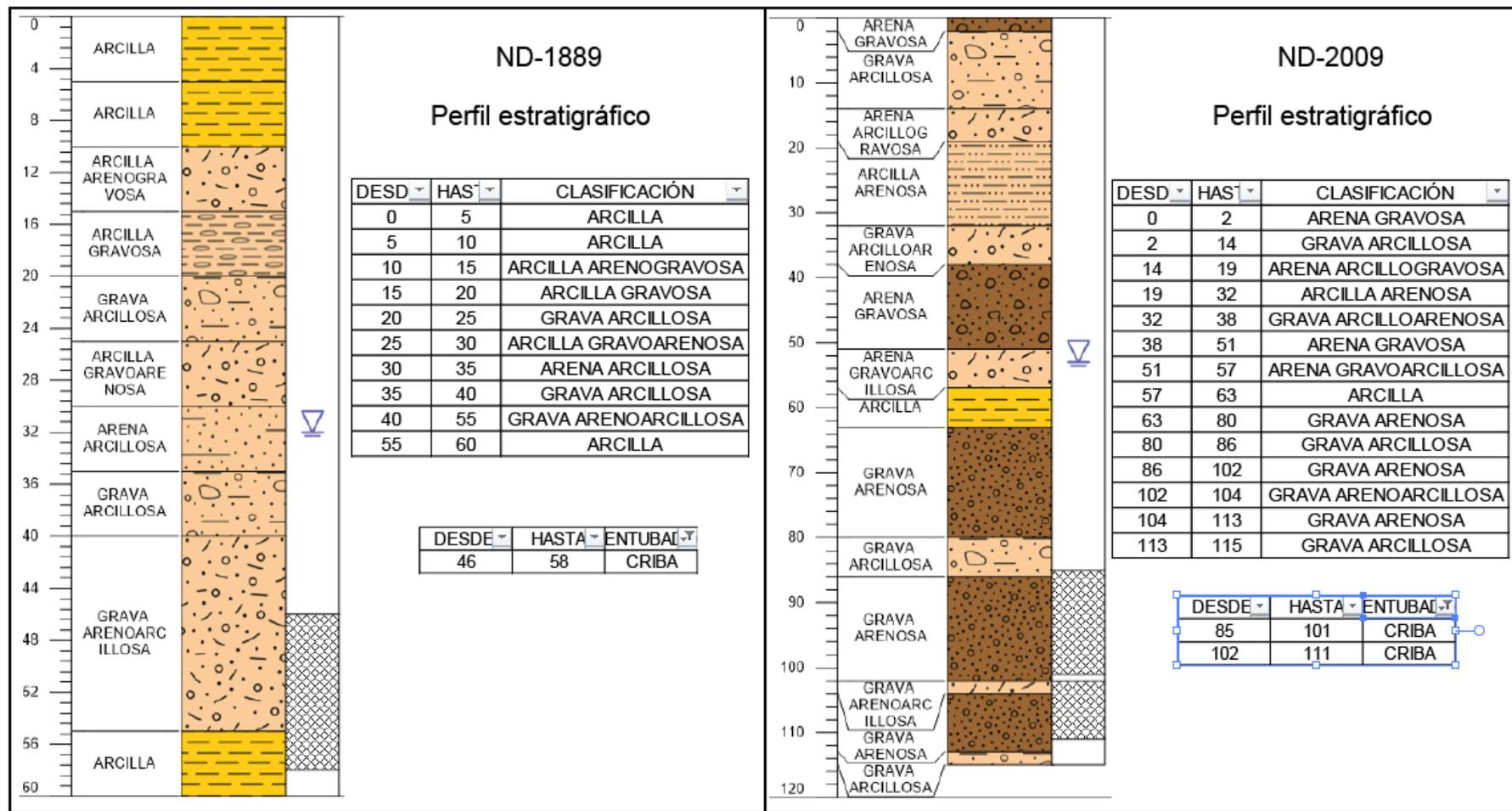


Figura 85: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-1889: 5504084 [m] S, 660969 [m] E, 88 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-2009: 5504973 [m] S, 660845 [m] E, 60 [m.s.n.m].

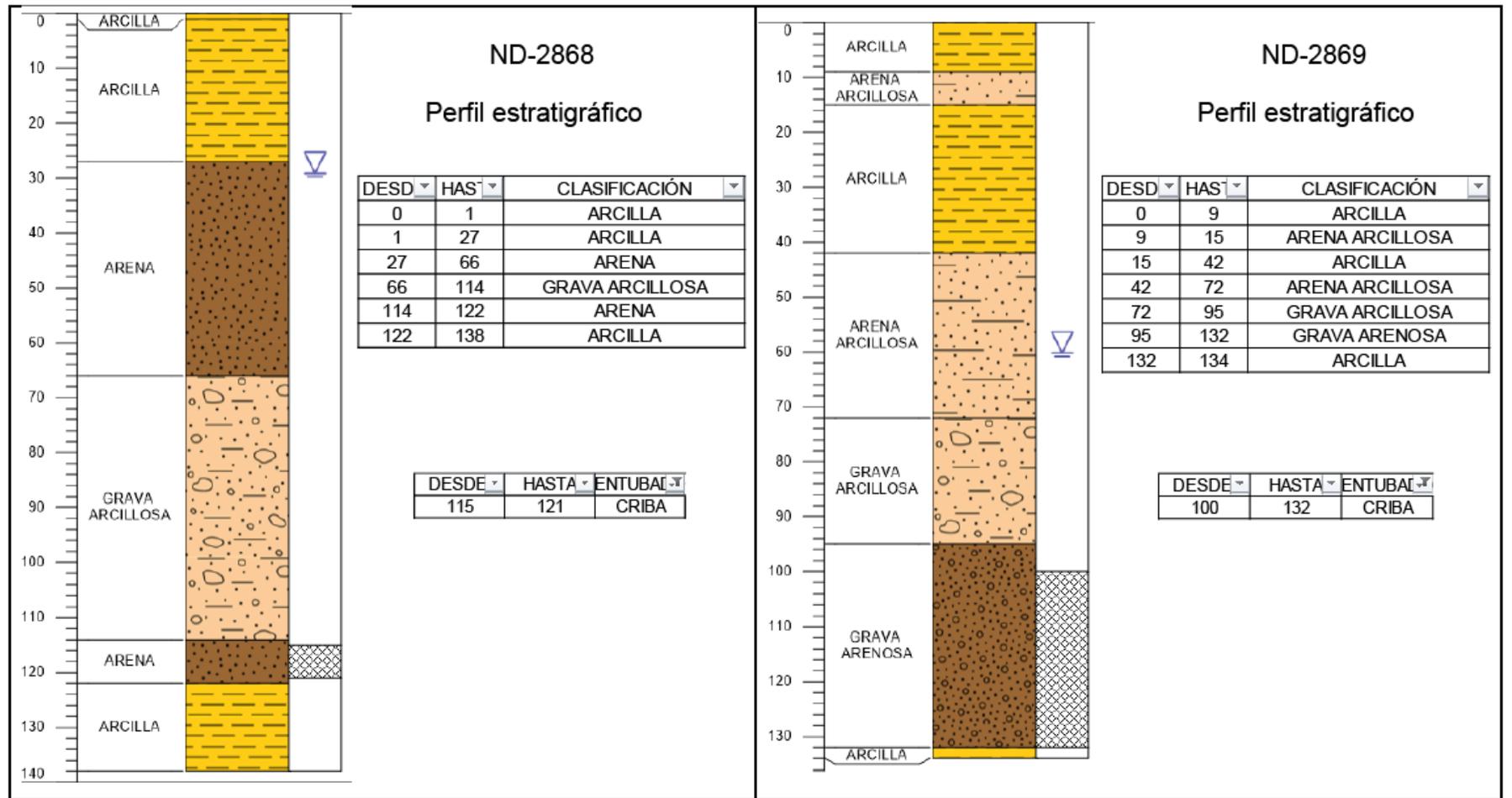


Figura 86: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-2868: 5507412 [m] S, 653573 [m] E, 92 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-2869: 5507538 [m] S, 653834 [m] E, 91 [m.s.n.m].

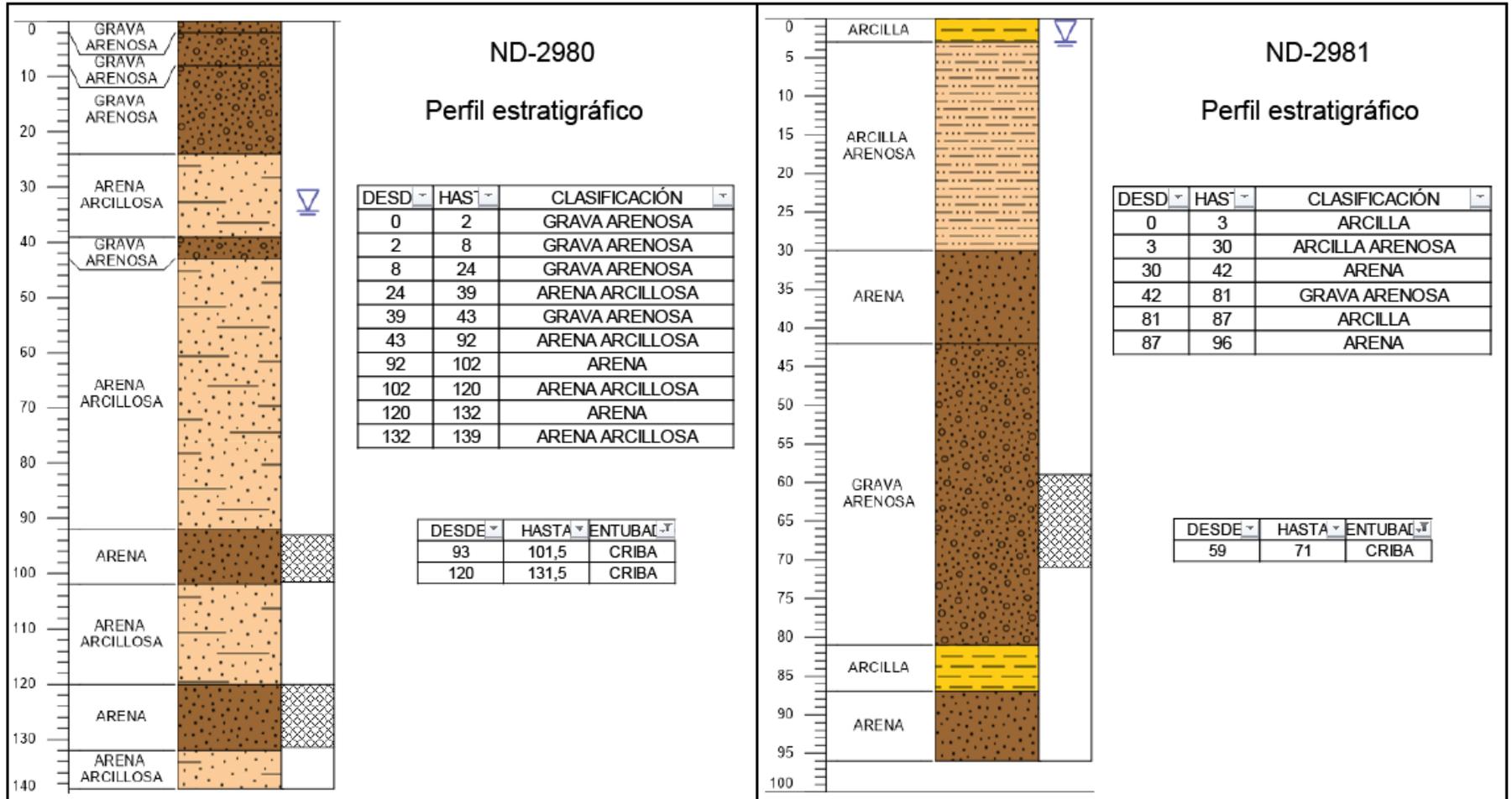


Figura 87: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-2980: 5502811 [m] S, 658657 [m] E, 84 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-2981: 5509385 [m] S, 670797 [m] E, 109 [m.s.n.m].

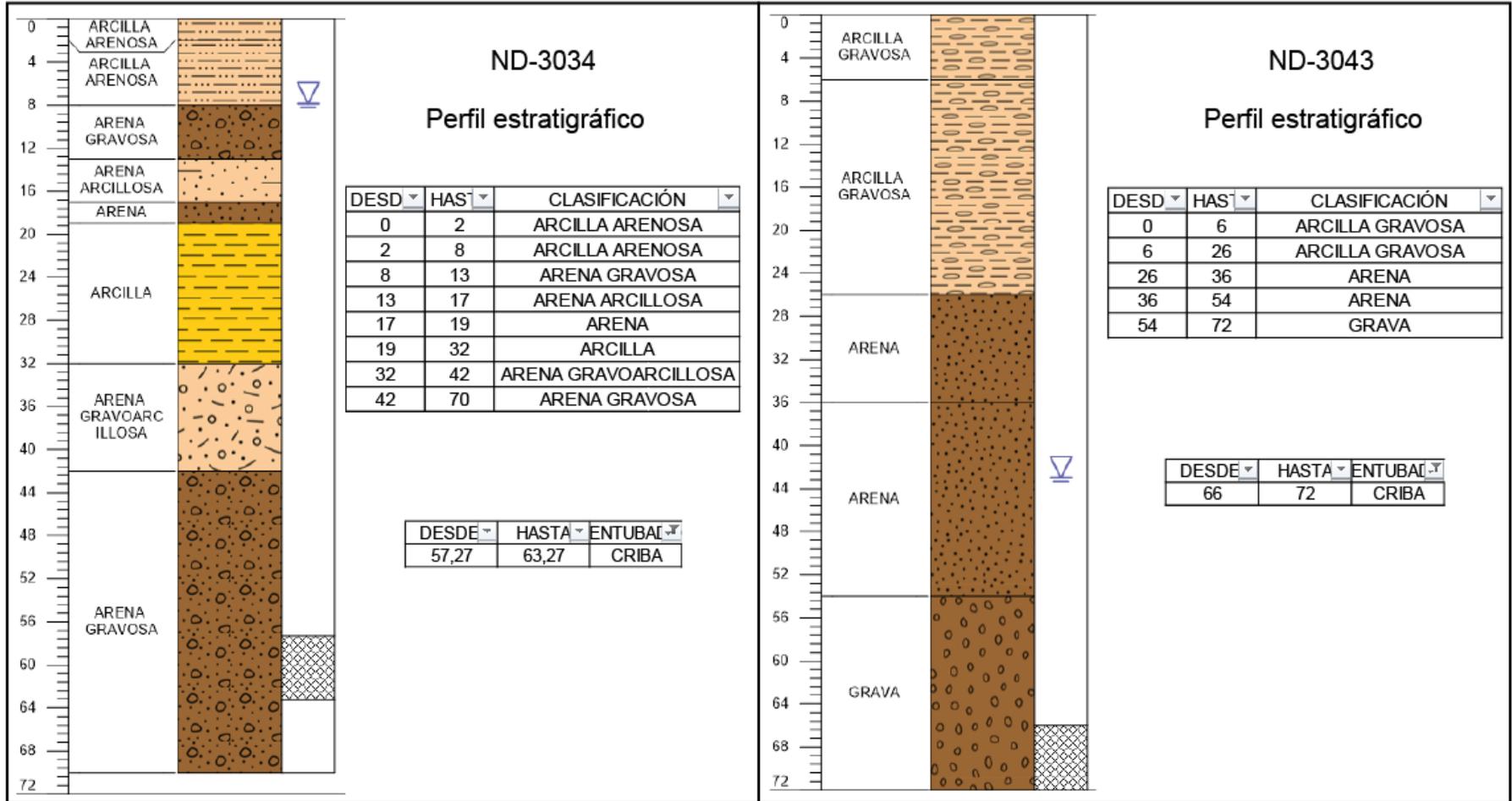


Figura 88: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3034: 5513783 [m] S, 667334 [m] E, 103 [m.s.n.m.]. b) Coordenadas ND-3043: 5499658 [m] S, 655848 [m] E, 98 [m.s.n.m.].

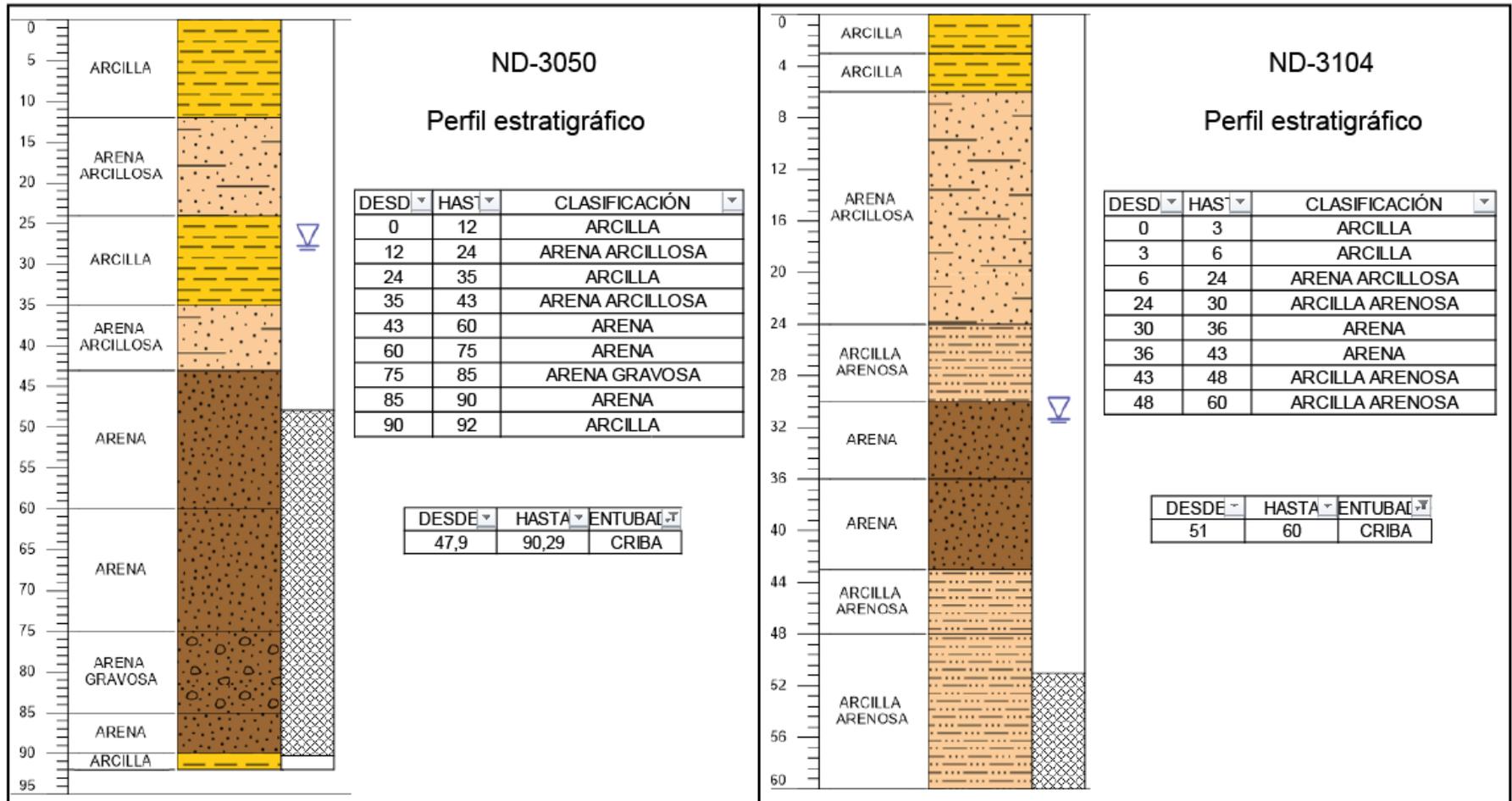


Figura 89: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3050: 5512046 [m] S, 657583 [m] E, 87 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-3104: 5513187 [m] S, 656521 [m] E, 108 [m.s.n.m].

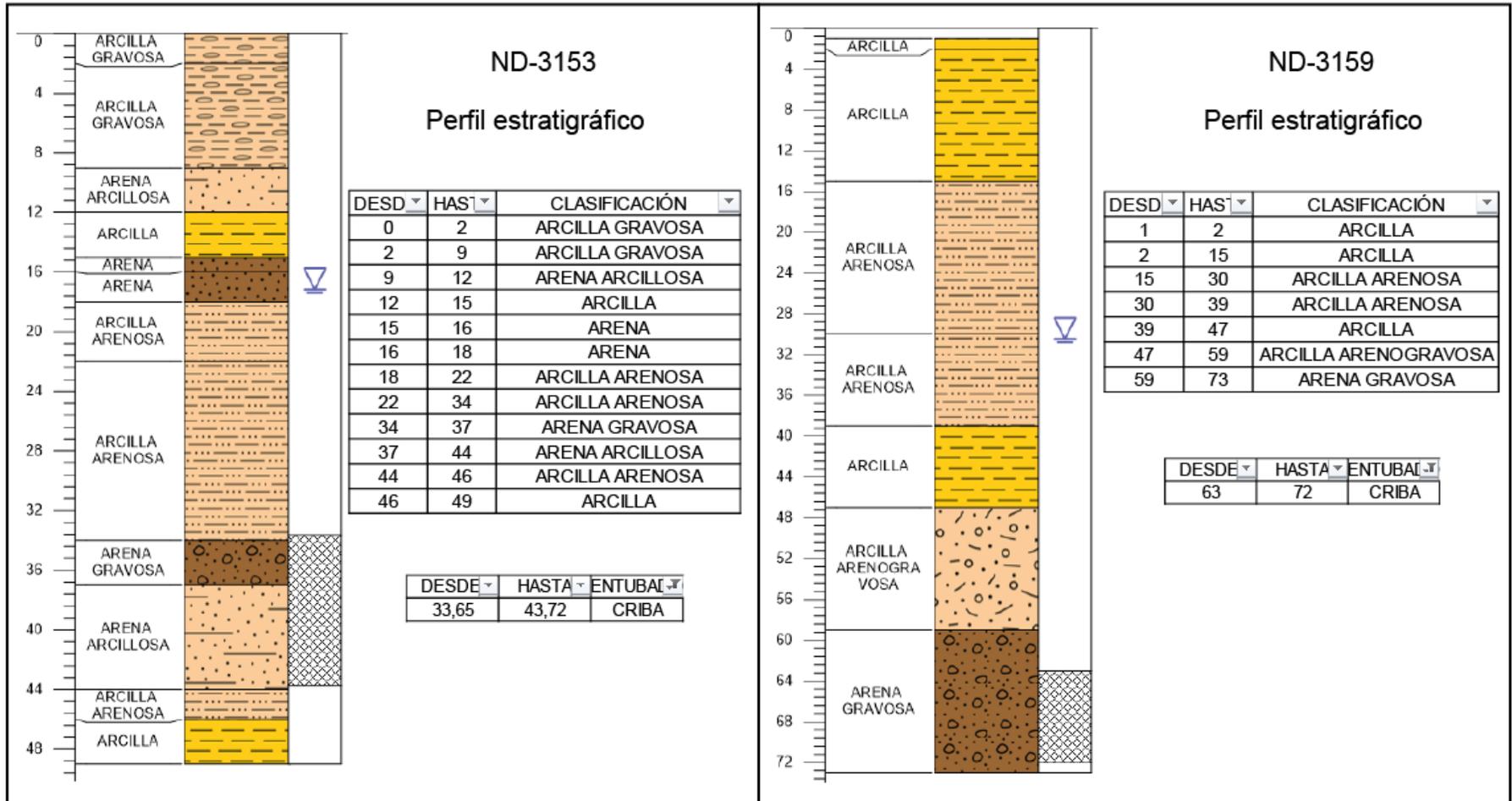


Figura 90: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3153: 5503284 [m] S, 660267 [m] E, 90 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-3159: 5519521 [m] S, 666840 [m] E, 108 [m.s.n.m].

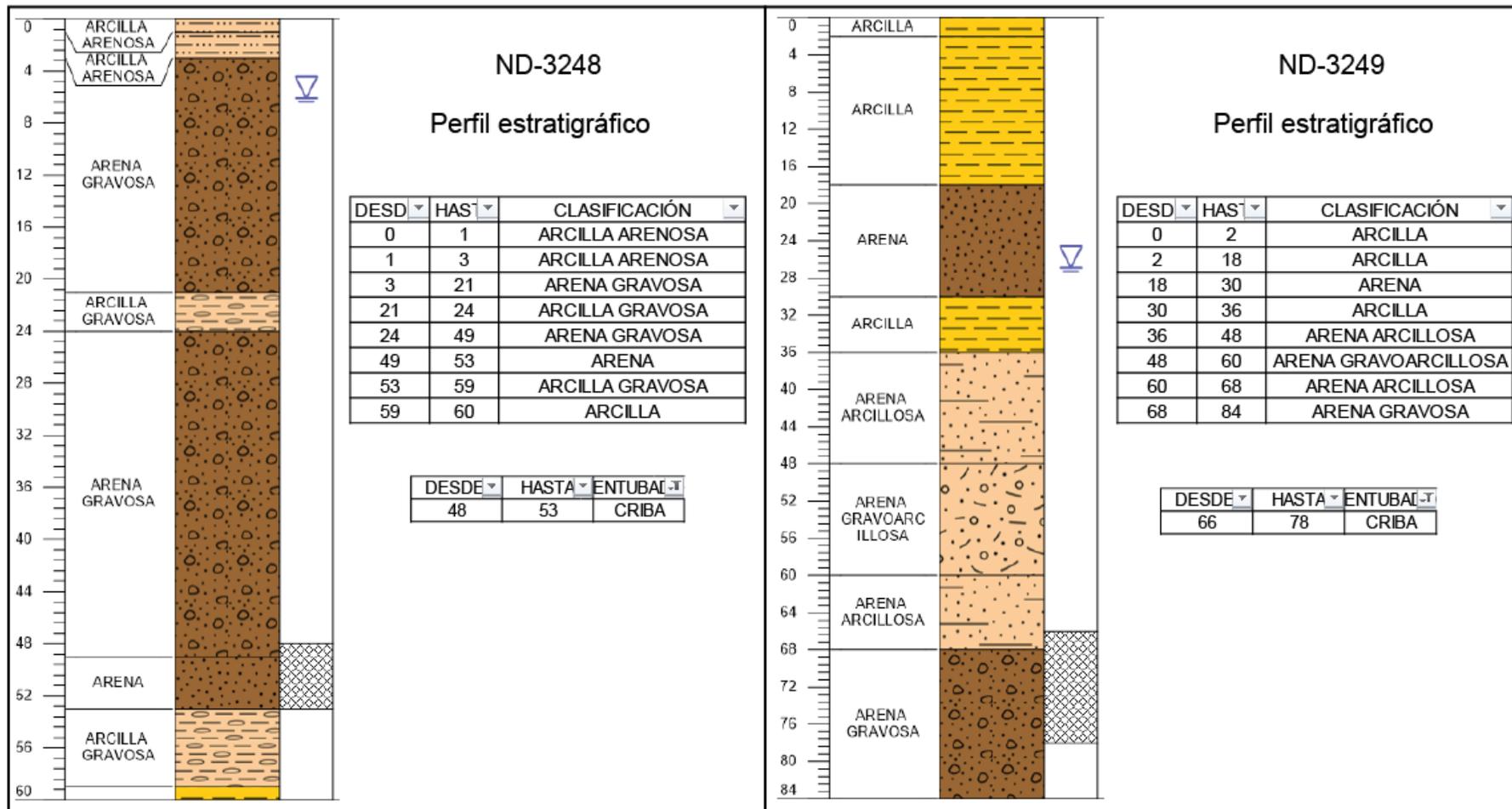


Figura 91: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3248: 5501302 [m] S, 662309 [m] E, 94 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-3249: 5503039 [m] S, 661528 [m] E, 85 [m.s.n.m].

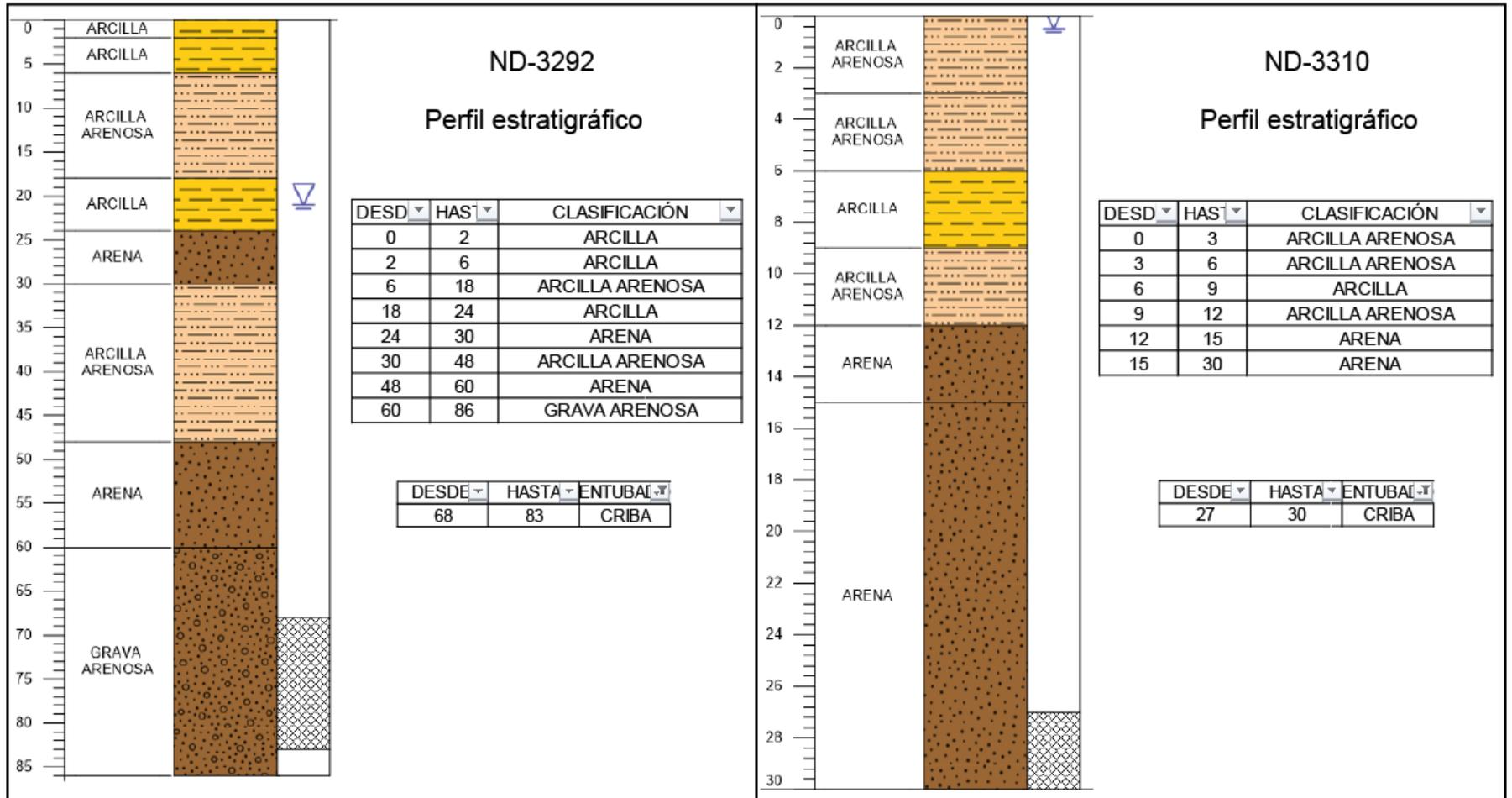


Figura 92: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3292: 5498804 [m] S, 660840 [m] E, 102 [m.s.n.m.]. b) Coordenadas ND-3310: 5503106 [m] S, 658847 [m] E, 66 [m.s.n.m.].

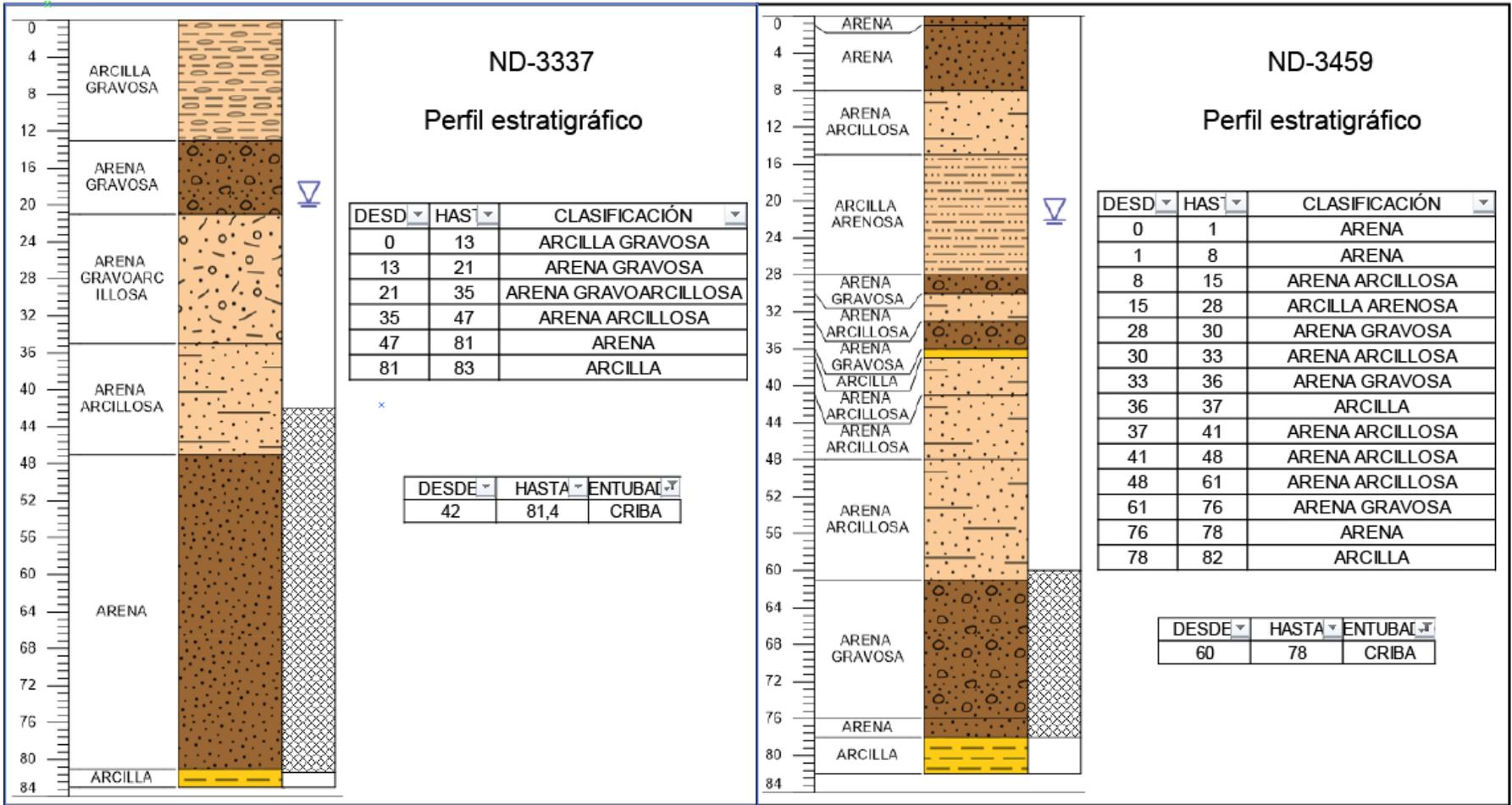


Figura 93: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3337: 5507486 [m] S, 664123 [m] E, 95 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-3459: 5510826 [m] S, 662559 [m] E, 92 [m.s.n.m].

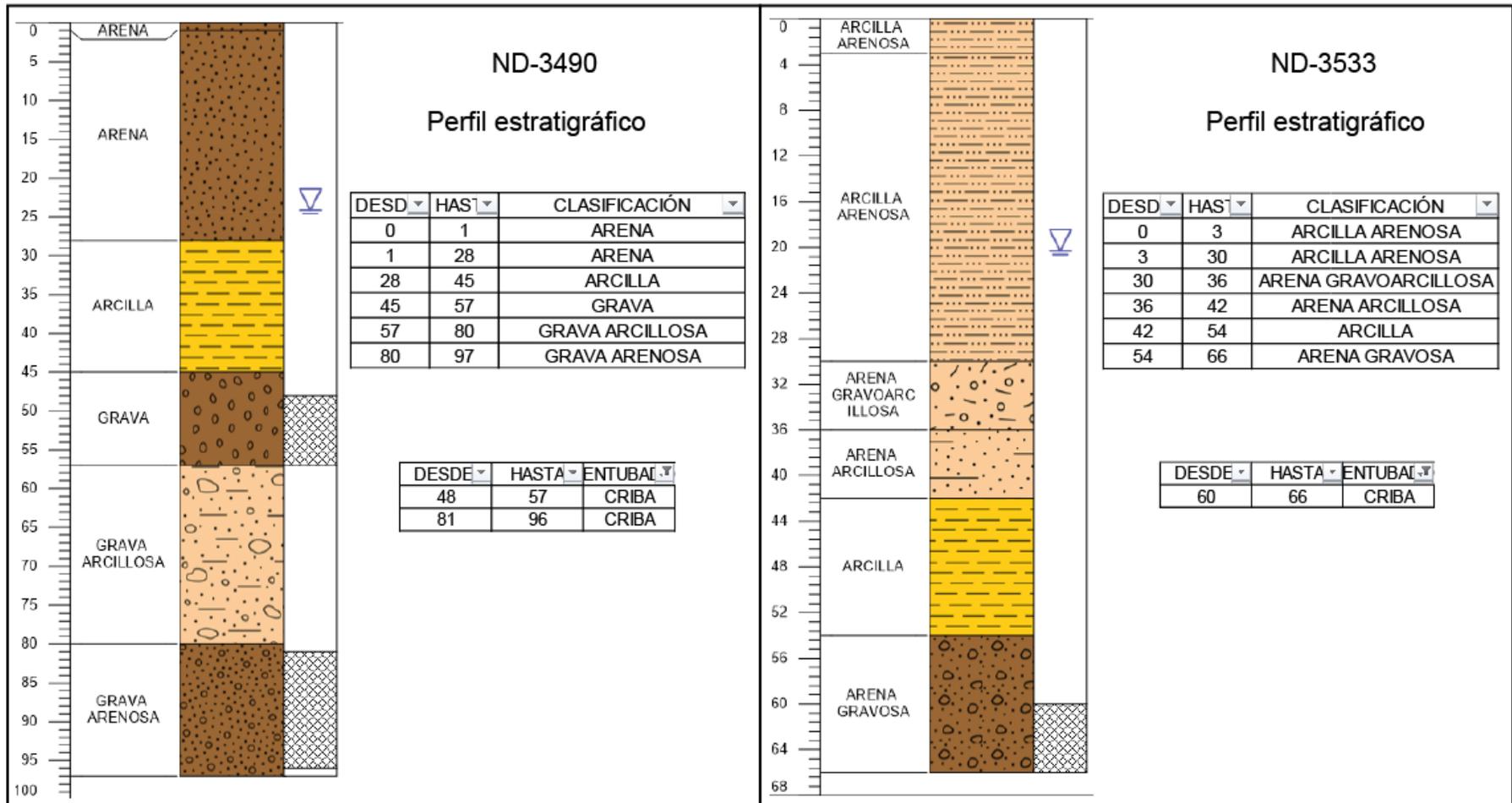


Figura 94: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3490: 5504581 [m] S, 661086 [m] E, 69 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-3533: 5515837 [m] S, 666161 [m] E, 104 [m.s.n.m].

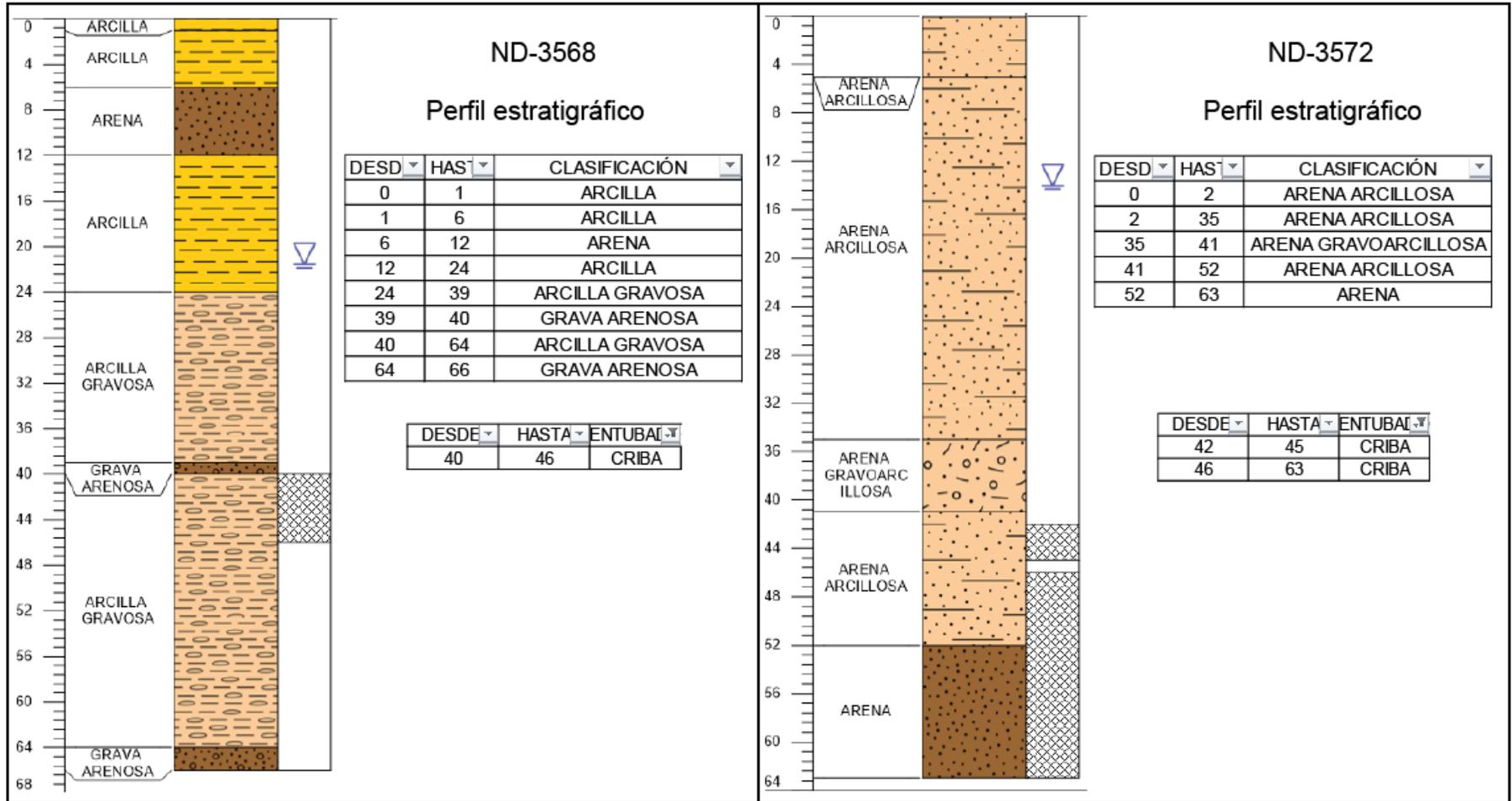


Figura 95: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3568: 5503428 [m] S, 660730 [m] E, 90 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-3572: 5507742 [m] S, 664046 [m] E, 96 [m.s.n.m].

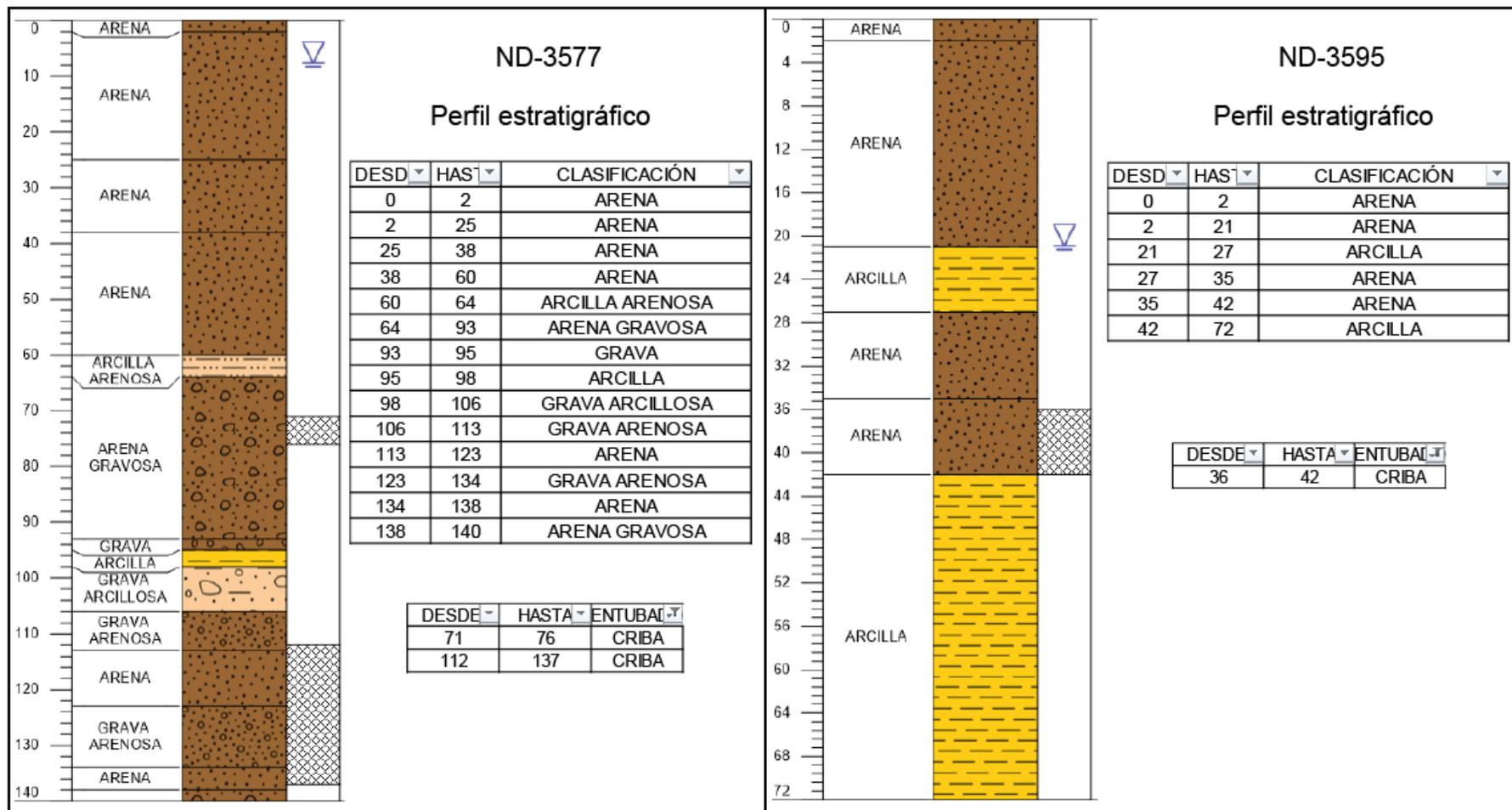


Figura 96: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3577: 5506693 [m] S, 670482 [m] E, 112 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-3595: 5503651 [m] S, 659325 [m] E, 86 [m.s.n.m].

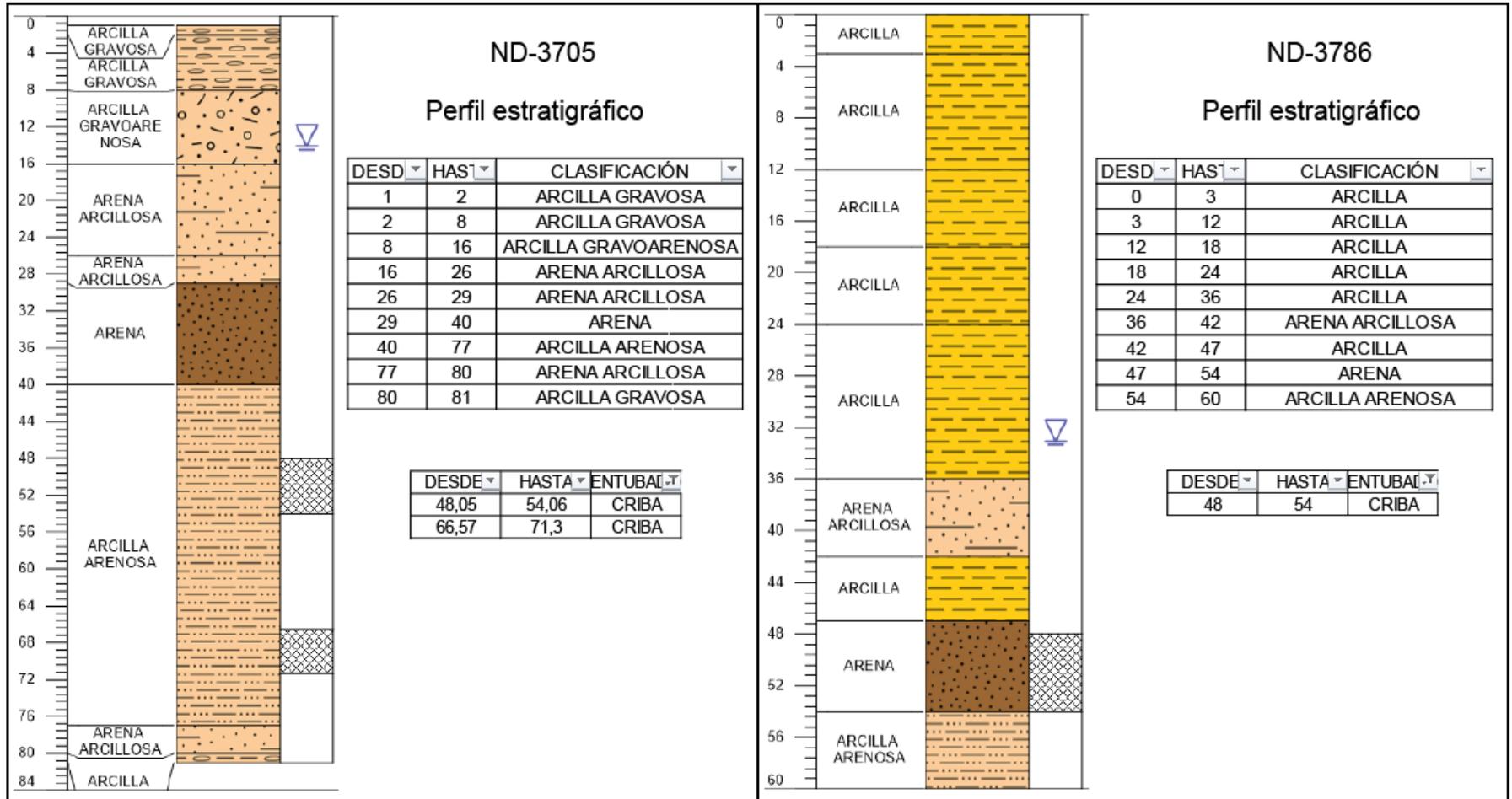


Figura 97: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3705: 5505835 [m] S, 667752 [m] E, 107 [m.s.n.m.]. b) Coordenadas ND-3786: 5503716 [m] S, 660809 [m] E, 94 [m.s.n.m.].

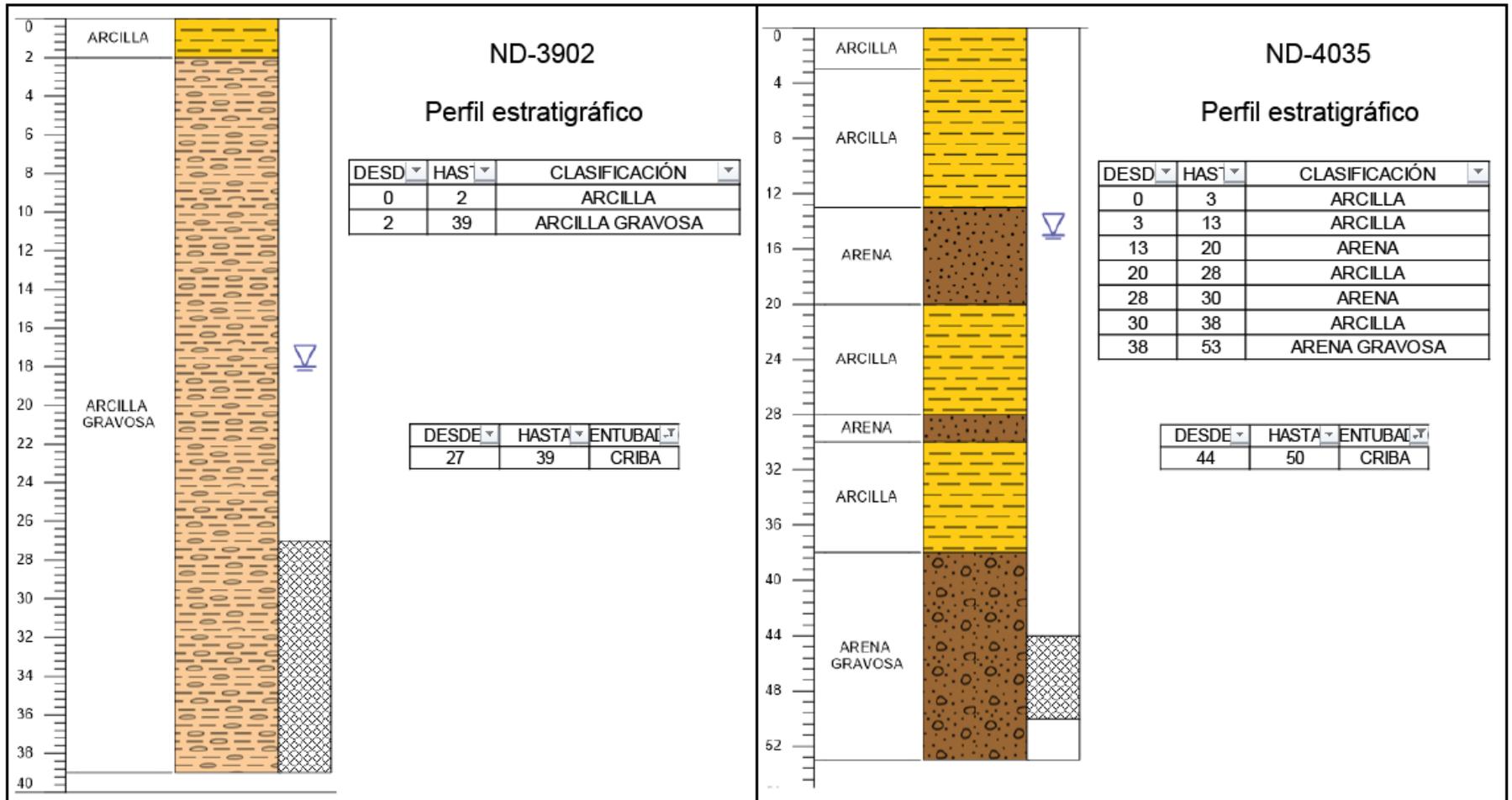


Figura 98: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-3902: 5508812 [m] S, 661065 [m] E, 91 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-4035: 5515325 [m] S, 665271 [m] E, 99 [m.s.n.m].

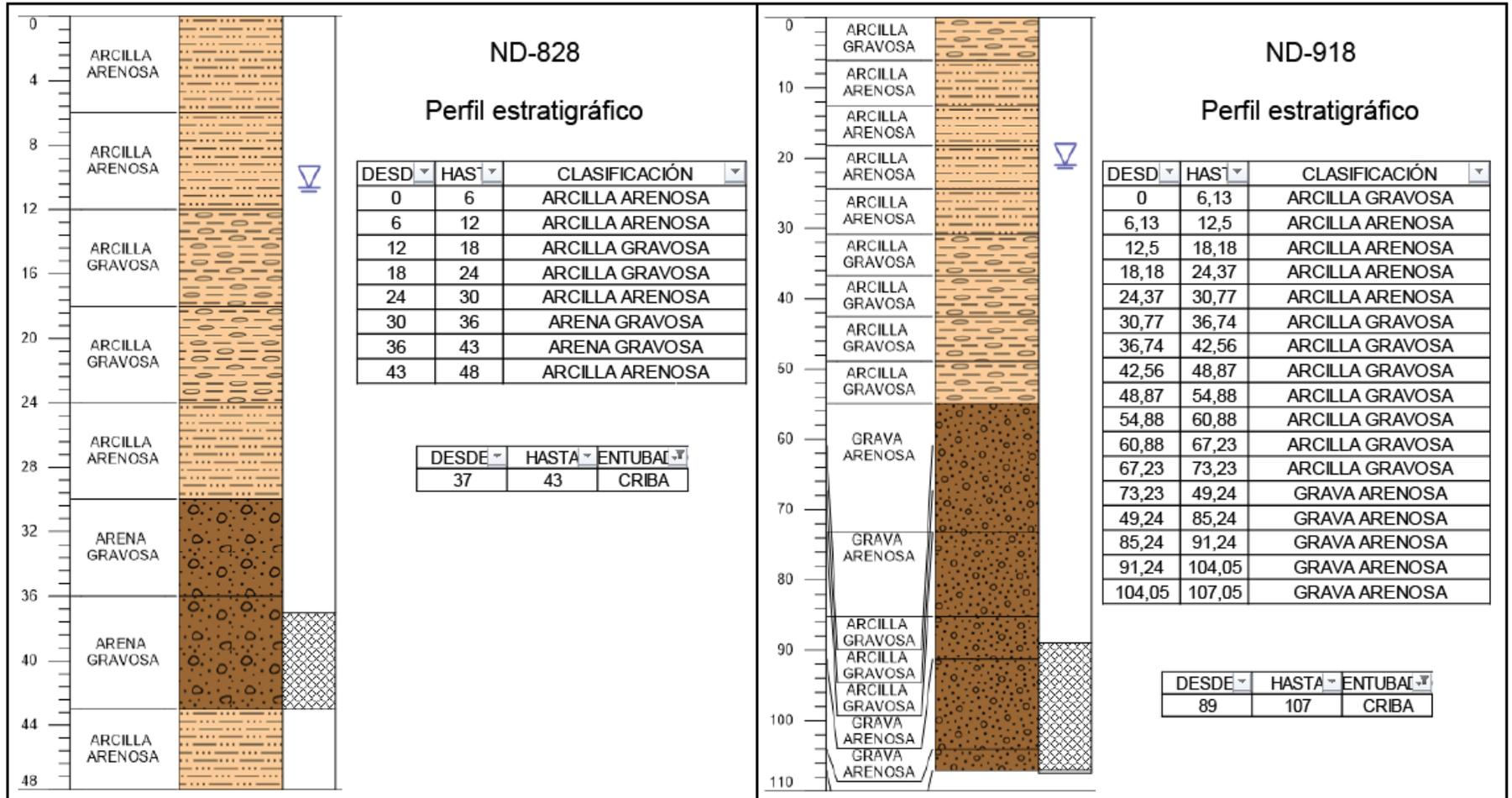


Figura 99: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-828: 5510670 [m] S, 662450 [m] E, 86 [m.s.n.m]. b) Coordenadas ND-918: 5510812 [m] S, 663225 [m] E, 97 [m.s.n.m].

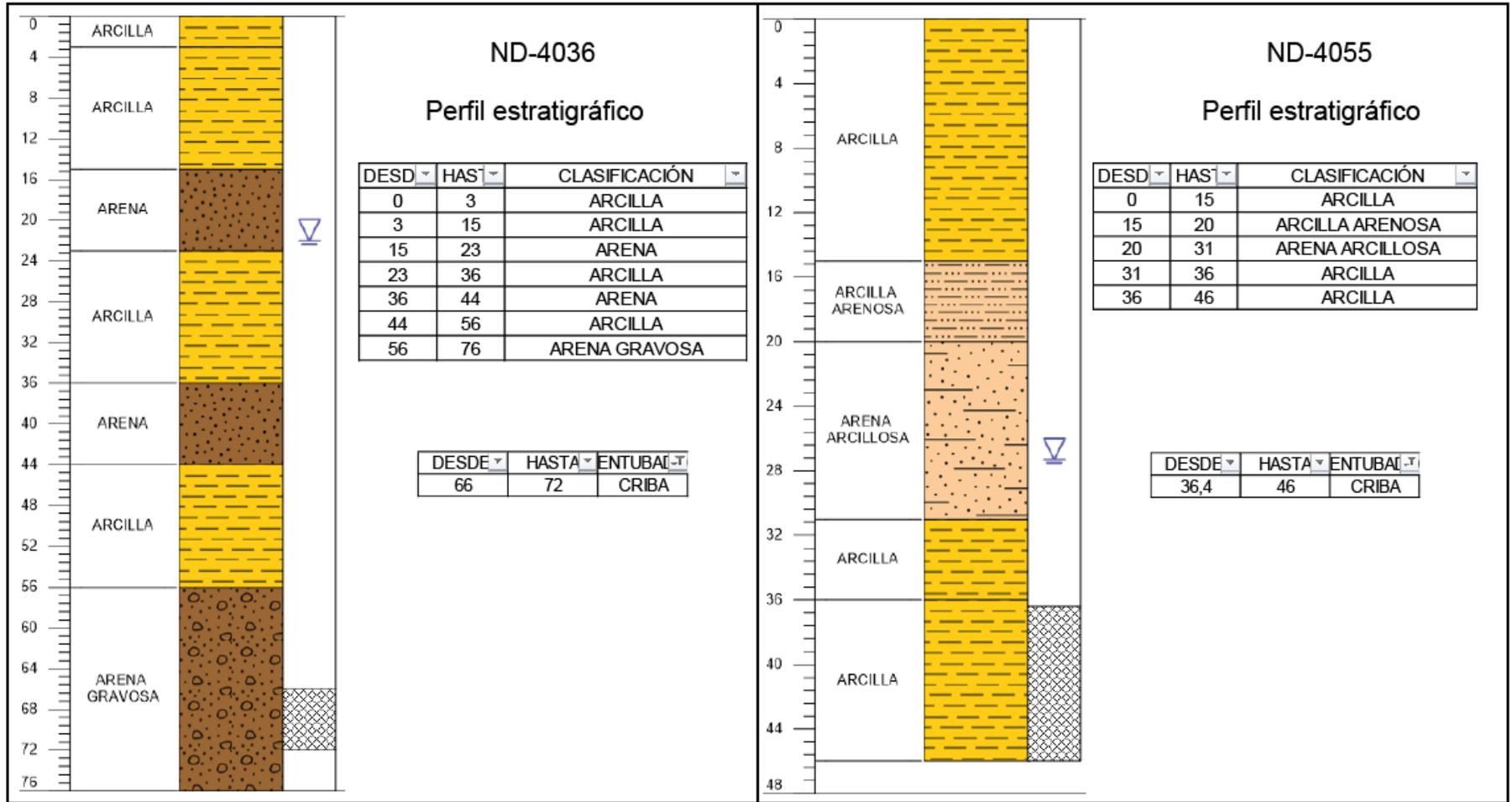


Figura 100: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-4036: 5514758 [m] S, 664210 [m] E, 96 [m.s.n.m.]. b) Coordenadas ND-4055: 5509826 [m] S, 661696 [m] E, 95 [m.s.n.m.].

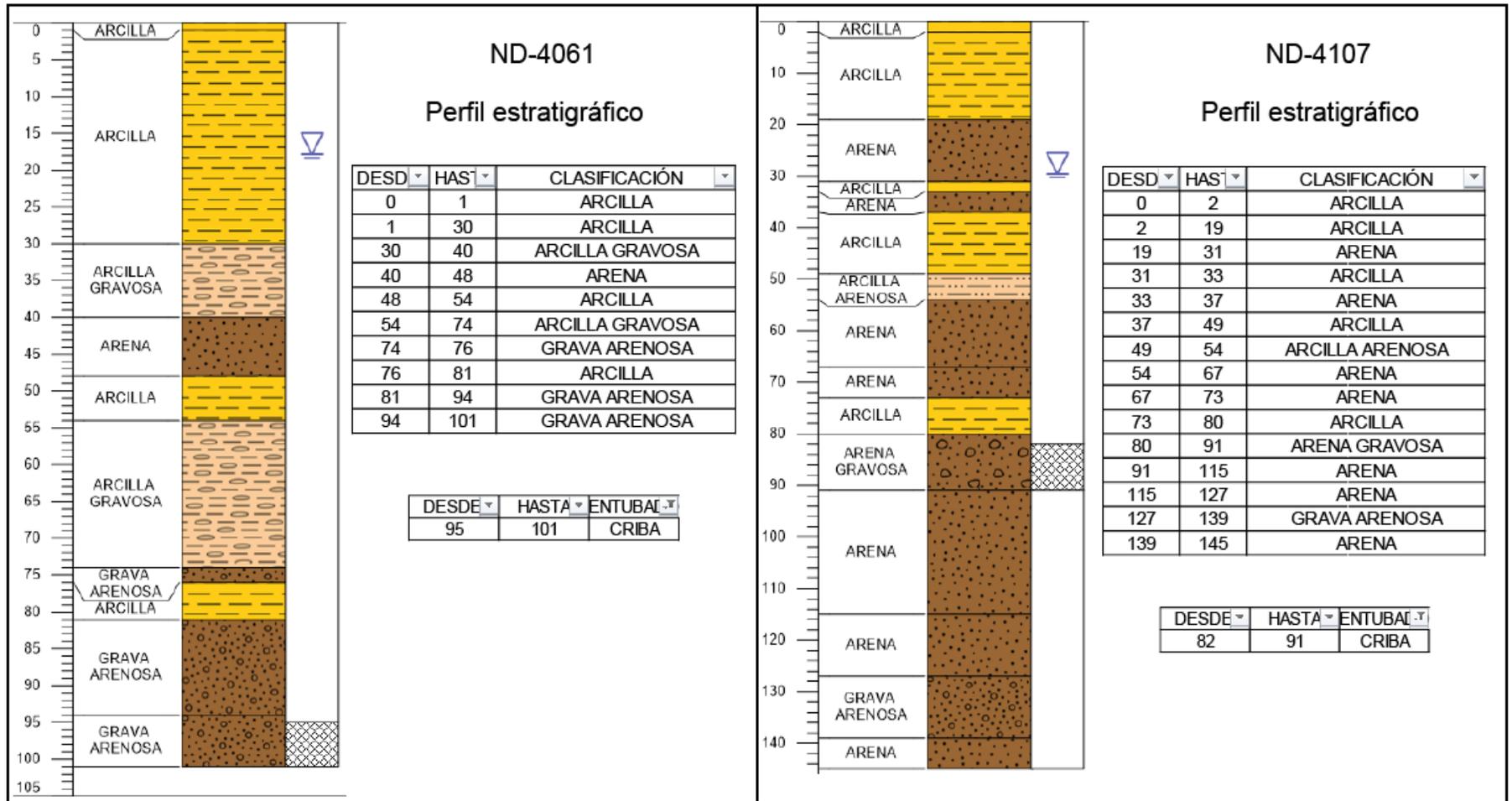


Figura 101: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-4061: 5500968 [m] S, 662266 [m] E, 94 [m.s.n.m.]. b) Coordenadas ND-4107: 5503129 [m] S, 658388 [m] E, 80 [m.s.n.m.].

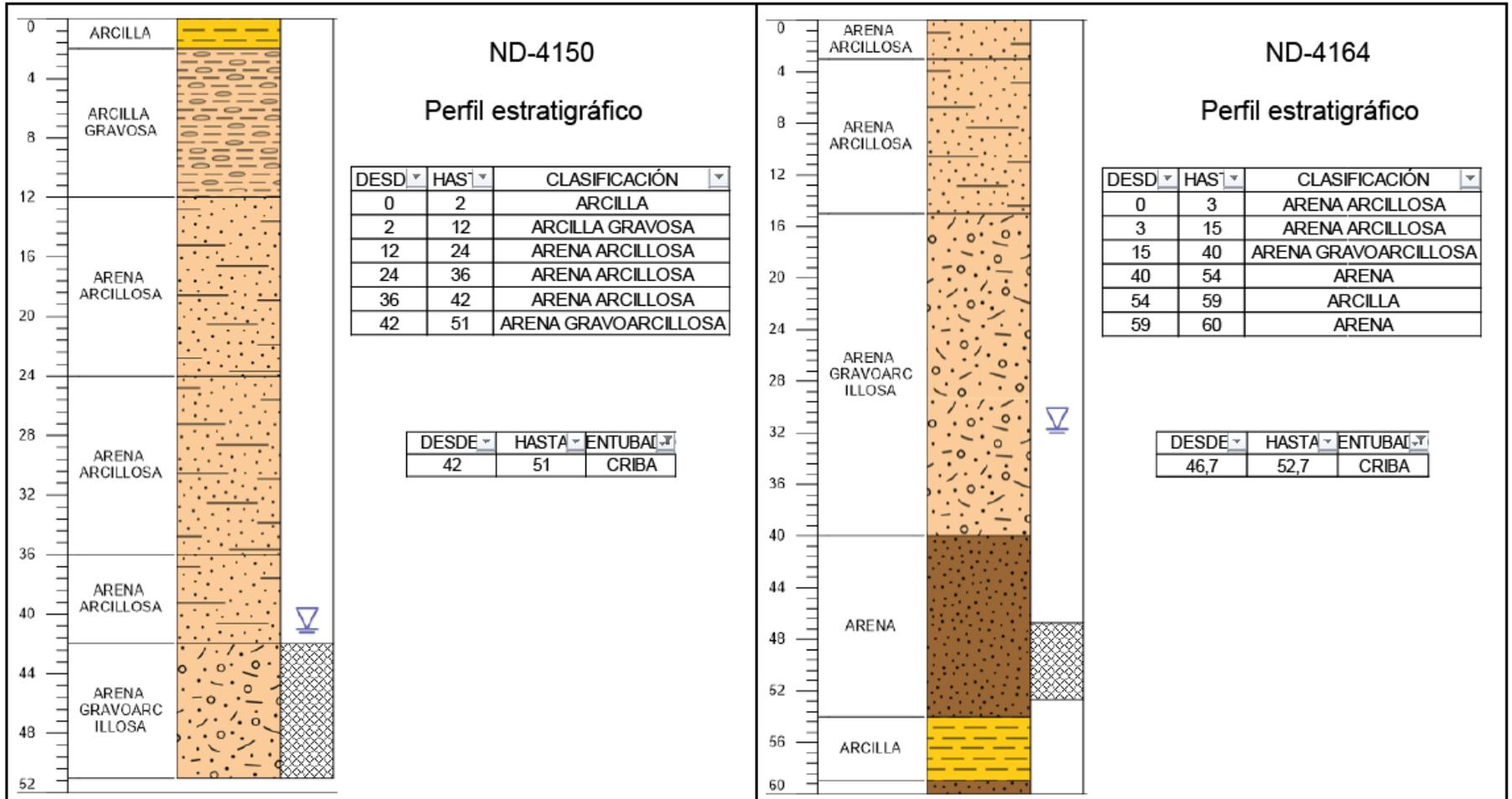


Figura 102: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-4150: 5503531 [m] S, 656098 [m] E, 91 [m.s.n.m.]. b) Coordenadas ND-4164: 5504084 [m] S, 660818 [m] E, 87 [m.s.n.m.].

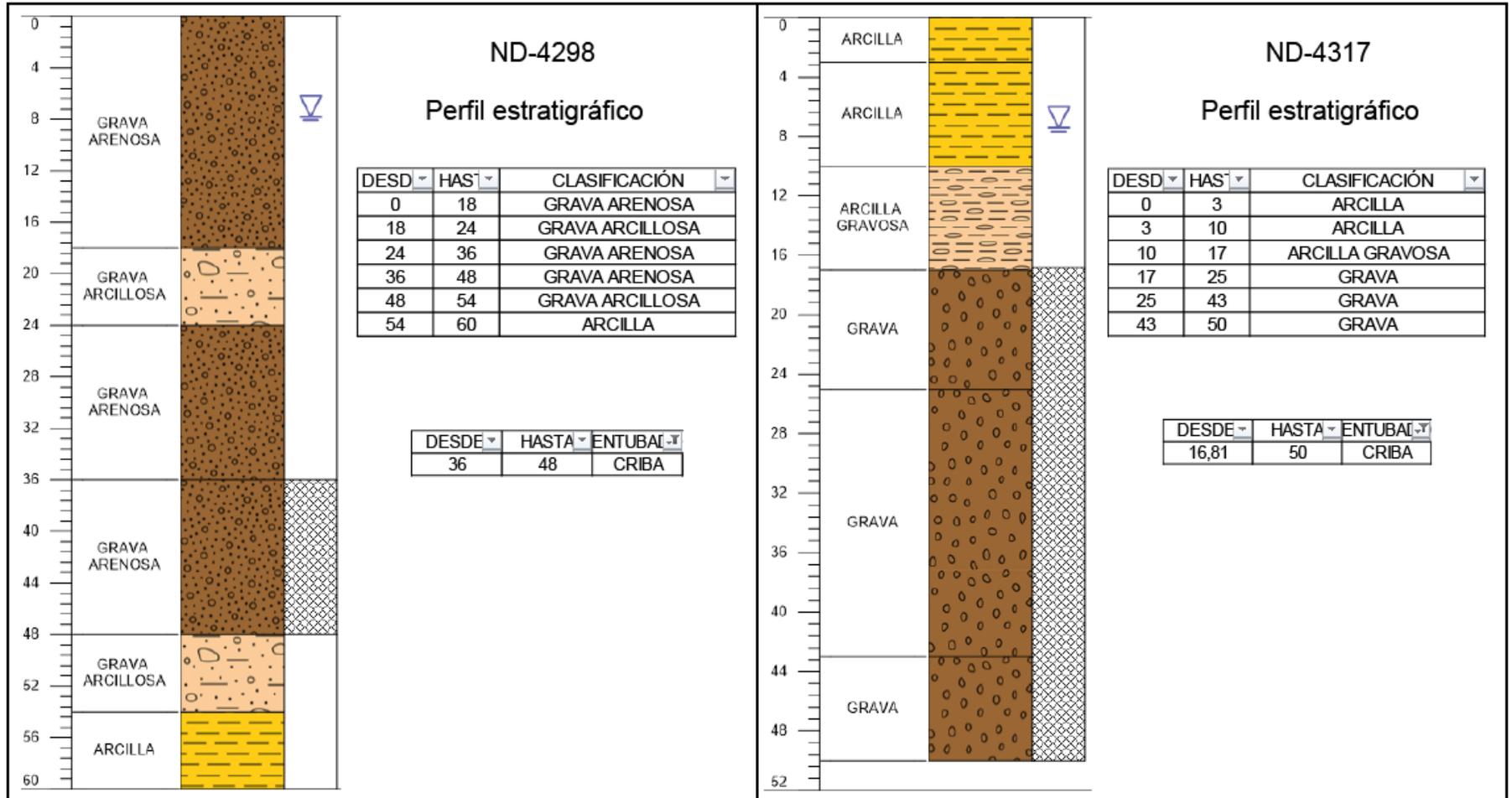


Figura 103: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-4298: 5500400 [m] S, 659941 [m] E, 92 [m.s.n.m.]. b) Coordenadas ND-4317: 5514397 [m] S, 658966 [m] E, 99 [m.s.n.m.].

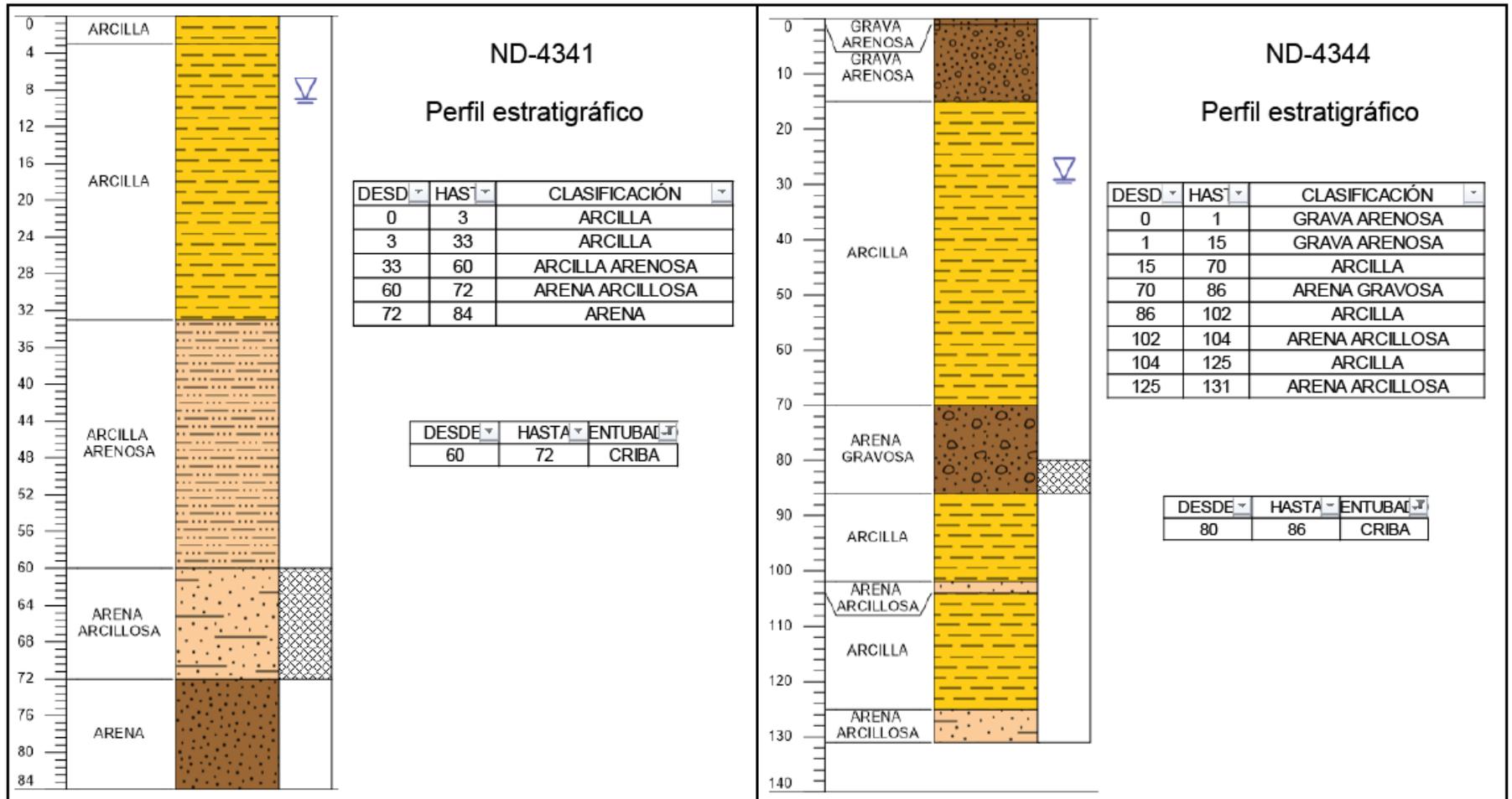


Figura 104: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-4341: 5508649 [m] S, 660269 [m] E, 79 [m.s.n.m.]. b) Coordenadas ND-4344: 5510253 [m] S, 659801 [m] E, 92 [m.s.n.m.].

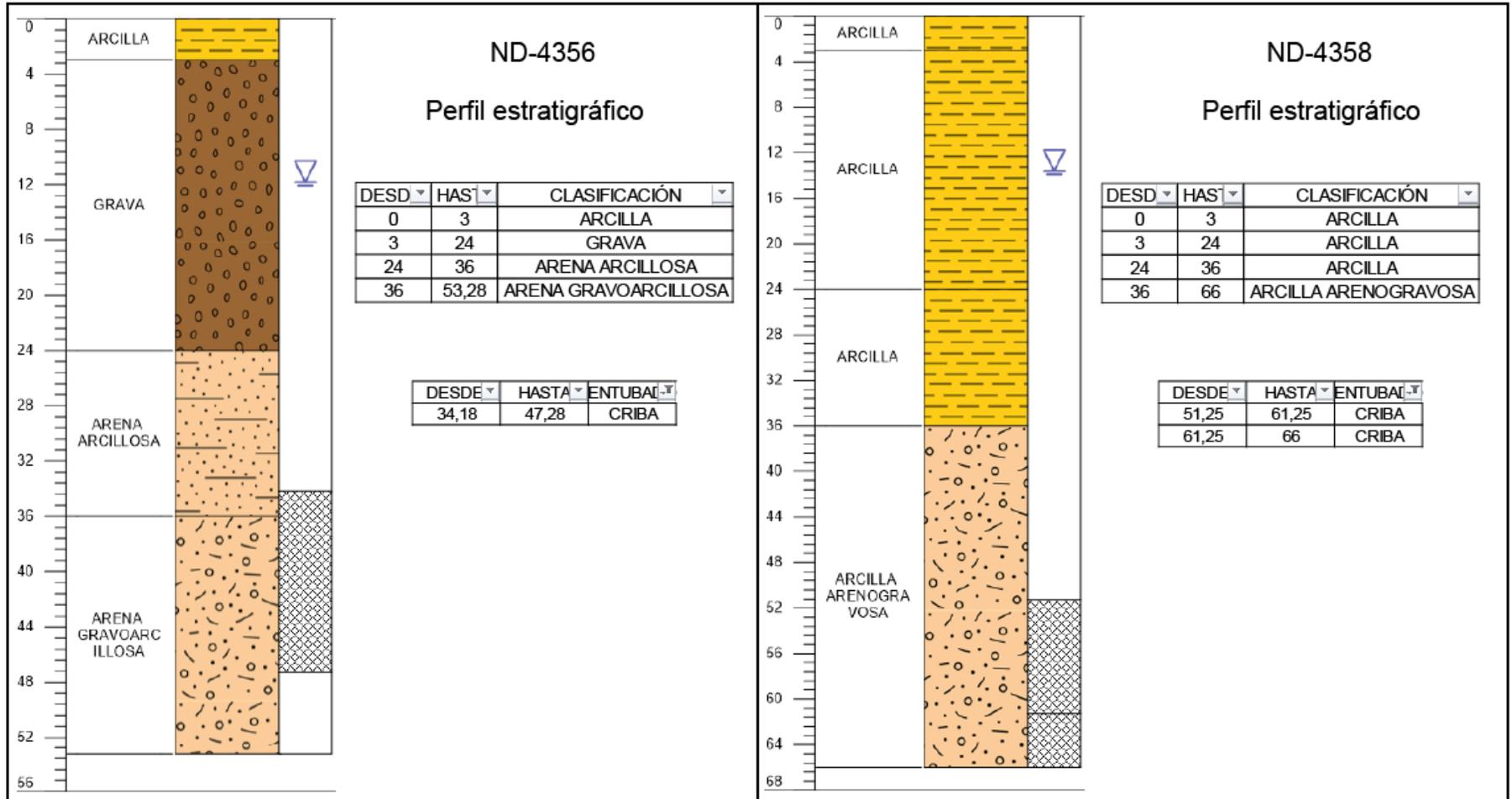


Figura 105: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-4356: 5501011 [m] S, 662654 [m] E, 92 [m.s.n.m.]. b) Coordenadas ND-4358: 5499148 [m] S, 661762 [m] E, 99 [m.s.n.m.].

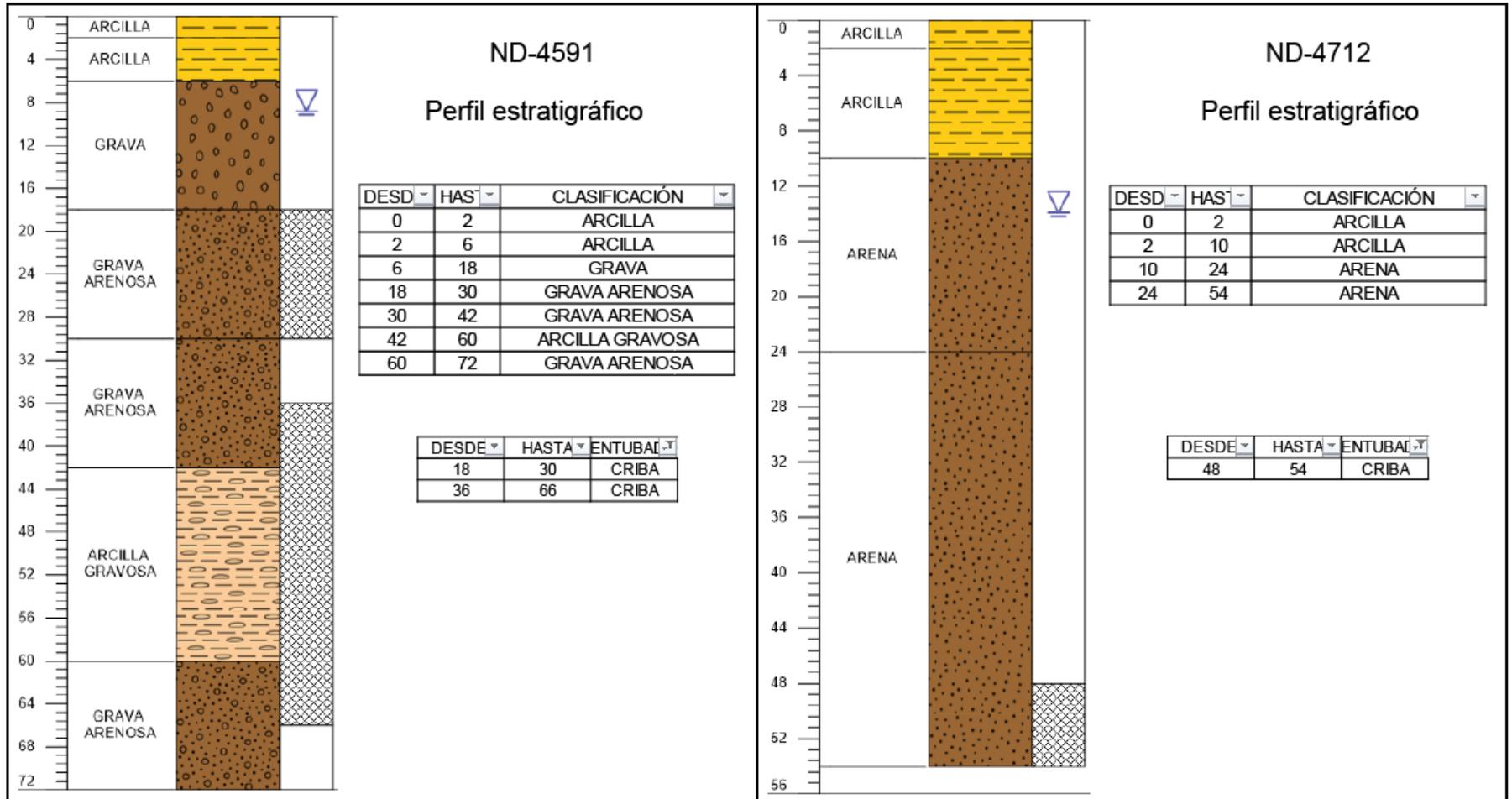


Figura 106: Estratigrafía: a) Coordenadas ND-4591: 5510641 [m] S, 665931 [m] E, 95 [m.s.n.m.]. b) Coordenadas ND-4712: 5508240 [m] S, 659832 [m] E, 68 [m.s.n.m.].

Anexo 9: Cotizaciones de bombas de calor

Tabla 44: Cotización de Bombas de calor ODEN geotermia en Chile.

Artículo	Cantidad	Precio USD	Total USD	Total CLP
Bomba de Calor GEO060Z	1	6.522	6.522	4.086.490
Fan Coil	4	827	3.308	2.072.694
Estanque 500 lts.	1	1.686	1.686	1.056.397
Conexiones Geo	1	654	654	409.777
Tuberías HDPE	700	2,1	1.470	921.058
Glycol colector	210	6	1.260	789.478
Instalación Geo	1	720	720	451.130
Transporte y estadía	1	1.170	1.170	733.087
Total Neto			16.790	10.520.110
IVA 19%			3.190	1.998.758
Total			19.980	12.518.869

Tabla 45: Resumen oferta de bomba de calor 15,5 [kW] BB solutions. Ingeniería y tecnología alemana.

Detalle	Precio (CLP) + IVA
Bomba de calor MTEC S18EuC 230V W55	8.060.516
Instalación bomba de calor	5.000.000
Sistema geotérmico	5.290.505
Instalación sistema geotérmico	3.000.000
Total	21.351.021

Tabla 46: Resumen oferta de bomba de calor 18,3 [kW] BB solutions. Ingeniería y tecnología alemana.

Detalle	Precio (CLP) + IVA
Bomba de calor MTEC S20EuC 230V W55	8.298.583
Instalación bomba de calor	5.500.000
Sistema geotérmico	6.181.608
Instalación sistema geotérmico	3.200.000
Total	23.180.191

Tabla 47: Cotización de Bombas de calor GeoGrow.

Ítem	Valor unitario (USD)	Unidades necesarias	Valor total (USD)	Valor (CLP)
Bomba de calor ecoGeo b1 5-22kW	10.759	1	9.468	6.144.680
Inercia geicer Lampesa 100 litros	996	1	96	646.404
Bomba Circulación UP 25/7,5 PVC	835	2	1.670	1.083.830
Transporte de materiales XI y estadía	3.082	1	3.082	2.000.218
Intercambio de placa 22kW	920	2	1.840	1.194.160
Montaje bomba de calor y accesorios	5.498	-	5.498	3.568.202
Puesta en marcha y pruebas	2.308	-	2.308	1.497.892
Cable control bomba sumergible	6	100	561	364.089
Tubería HDPE 40	3	100	300	194.700
Total Neto CLP				16.694.175
IVA (19%)				3.171.893
Total CLP				19.866.068