

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

**Profesor Patrocinante**

Ramón Díaz Noriega

# **EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS DE MUY BAJA ENTALPÍA EN CHILE**



**Boris Herman Medina Ortiz**

Informe de Memoria de Título

para optar al título de

Ingeniero Civil de Minas

---

SEPTIEMBRE 2020

## RESUMEN

La evaluación de recursos geotérmicos de muy baja entalpía es fundamental para promover el desarrollo, diseño y planificación de proyectos que hagan uso de estos recursos. Este estudio propone una serie de mapas preliminares con evaluaciones de los recursos geotérmicos de muy baja entalpía a escala país, desarrollados a partir de datos públicos disponibles en Chile.

La evaluación se realiza mediante el uso de un sistema de información geográfica (GIS) y datos geológicos, hidrogeológicos y valores bibliográficos de parámetros térmicos asociados a las rocas identificadas.

La revisión bibliográfica previa, permite determinar que los métodos más adecuados para el caso de estudio son el Método Volumétrico y el Método sHE (*specific Heat Exchanger*). A partir de los cuales, se elaboran varios mapas del territorio chileno continental con evaluaciones de los recursos geotérmicos de muy baja entalpía.

Los resultados obtenidos, con el Método Volumétrico, permiten confeccionar 4 mapas con escenarios diferentes que representan el potencial de energía geotérmica de muy baja entalpía extraíble [H1] para una profundidad de 100 metros. Los valores obtenidos con este método se encuentran en un rango entre los 0,007 GJ/m<sup>2</sup> y los 0,345 GJ/m<sup>2</sup>, con un valor promedio de 0,104 GJ/m<sup>2</sup>. El potencial total en el territorio continental de Chile se estima entre los 76,81 EJ y los 79,71 EJ.

Los resultados obtenidos, con el Método sHE, corresponden a 8 mapas que representan potencial de energía geotérmica de muy baja entalpía estimado en función de los valores de captación de calor específicos tabulados en la norma alemana VDI4640. Los mapas obtenidos consideran dos escenarios principales, condición “No saturado” y “Saturado” y dos rangos de funcionamiento de la bomba de calor para 1800 h/año y 2400 h/año. Los 4 escenarios adicionales se plantearon en función de los datos de pozos disponibles con mediciones de nivel freático, determinando que puede darse hasta un aumento del 14% en el valor promedio de potencial obtenido considerando el efecto del nivel del agua subterránea con respecto a la condición “No saturado” y pone de manifiesto la importancia de los datos hidrogeológicos.

## ABSTRACT

Evaluation of very low-enthalpy geothermal resources is essential if you want to promote development, design and planning of projects that use these resources. This work proposes a series of preliminary maps of very low enthalpy geothermal resources of a regional scale, developed from public data available in Chile.

The evaluation is carried out using Geographic Information System (GIS) and geological, hydrogeological data and bibliographic values of thermal properties associated with the identified rocks.

The previous bibliographic review allows to determine that the most suitable methods for this study are Volumetric Method and sHE (specific Heat Exchanger) Method. From which, several maps of continental Chilean territory are made with evaluations of very low enthalpy geothermal resources.

The results obtained, with the Volumetric Method, allows to make 4 maps with different scenarios that represent very low-enthalpy geothermal energy potential extractable [H1] for a depth of 100 meters. The values obtained with this method are in a range between 0.007 GJ / m<sup>2</sup> and 0.345 GJ / m<sup>2</sup>, with an average value of 0.104 GJ / m<sup>2</sup>. The total potential in the continental territory of Chile is estimated between 76.81 EJ and 79.71 EJ.

The results obtained, with the sHE Method, corresponds to 8 maps representing very low-enthalpy geothermal potential estimated based on the specific heat capture values tabulated in the German standard VDI4640. The maps obtained consider two main scenarios, "Unsaturated" and "Saturated" conditions and two operating ranges of the heat pump for 1800 h / year and 2400 h / year. The 4 additional scenarios were proposed based on the data from available wells with groundwater level measurements, determining that there may be up to a 14% increase in the average value of potential obtained considering the effect of the groundwater level with respect to the "Unsaturated" condition and makes evident the importance of hydrogeological data.

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, especialmente a mi madre que estuvo presente durante todo el ciclo universitario, ya sea brindando apoyo en momentos difíciles, levantándose temprano para no llegar tarde a clases (no siempre lo conseguía), alegrándose más que yo por mi rendimiento en algunas asignaturas, prendiendo la estufa para que no pasara frío en mi pieza, retándose por hablar muy fuerte y quedarme en el computador hasta muy tarde, y una lista interminable de agradables recuerdos que aliviaron e hicieron entretenida la vida universitaria.

A mi amigo Thair que conocí en mi primer año de Ingeniería Civil de Minas, que por cosas de la vida se tuvo que ir de Concepción, pero aun estudiando en la USACH el vínculo formado se ha mantenido, brindándome en reiteradas ocasiones alojamiento, compañía, risas y sirviendo de motor a través del cual conocí gente realmente maravillosa, que pese a distancia siempre se hace presente de forma incondicional durante esos “tarreos” legendarios que nos hemos mandado.

A mis compañeros, Yasna, Ricardo, Karen, Rafael, Wladimir, gracias por todos esos buenos momentos, risas, compañía y por dejar frases para el recuerdo como: “No estudié nada”, “A la vida”, “Si estudiaste, fuiste a clases y sabes la materia, te ira bien”, demás está decirles que mi casa siempre está disponible para esas juntas en la casa del Boris que tanto disfrutamos.

A un tal “cgr18” quien se transformó en este último en uno de mis mejores amigos, casi un hermano con quien compartí alegrías, frustraciones y muy buenos momentos.

A los amigos de mi tierra, Felipe, Camila, Adrián, Bastián, que siempre han estado presentes para compartir sus cervezas, fifas, juegos de mesa y asados.

A mis profesores, especialmente a mi profesor guía, por su apoyo y compromiso incondicional durante el desarrollo de este trabajo y a todos aquellos que de alguna u otra manera me ayudaron y estuvieron presentes durante este proceso, de verdad muchas gracias.



## INDICE DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
	1.1 Contextualización del problema .....	1
	1.2 Objetivos.....	3
	1.2.1 Objetivos General.....	3
	1.2.2 Objetivos Específicos .....	3
	1.3 Alcances y limitaciones del estudio.....	3
	1.4 Metodología general de trabajo .....	4
<b>2</b>	<b>ANTECEDENTES.....</b>	<b>6</b>
	2.1 Conceptos generales .....	6
	2.2 Usos de la energía geotérmica .....	9
	2.3 Tecnologías de aprovechamiento directo de los recursos geotérmicos .....	10
	2.3.1 Bomba de calor geotérmica.....	10
	2.3.2 Sistemas de captación geotérmica.....	13
	2.4 Estado actual de la explotación geotérmica a nivel mundial .....	17
	2.5 Estado Actual de la explotación de energía geotérmica en Chile.....	20
	2.6 Barreras en la explotación de la energía geotérmica en Chile .....	22
<b>3</b>	<b>EVALUACIÓN DE RECURSOS GEOTÉRMICOS .....</b>	<b>28</b>
	3.1 Conceptos previos.....	28
	3.2 Factores de interés .....	28
	3.3 Métodos de evaluación de recursos geotérmicos.....	29
	3.3.1 Método Volumétrico .....	29
	3.3.2 Método evaluación de flujo térmico superficial.....	30
	3.3.3 Método sHE (specific heat exchanger).....	31
	3.3.4 Método balance energético de Pikul.....	33
	3.4 Evaluación de recursos geotérmicos mediante tecnología GIS .....	35
<b>4</b>	<b>DESARROLLO METODOLÓGICO.....</b>	<b>38</b>
	4.1 Recopilación y análisis de información .....	38
	4.2 Definición del método de evaluación de potencial geotérmico .....	39

4.3	Creación de los mapas de potencial geotérmico de muy baja entalpía .....	40
4.3.1	Método volumétrico .....	40
4.3.2	Método sHE (specific heat exchanger).....	45
5	<b>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>51</b>
5.1	Método Volumétrico.....	51
5.1.1	Representación gráfica .....	51
5.1.2	Estadísticas generales .....	52
5.1.3	Comparación de resultados .....	53
5.1.4	Distribución espacial e interpretación del potencial geotérmico.....	54
5.1.5	Oportunidades de mejora.....	54
5.2	Método sHE.....	55
5.2.1	Representación gráfica .....	55
5.2.2	Estadísticas generales .....	56
5.2.3	Comparación de resultados .....	57
5.2.4	Distribución e interpretación del potencial .....	58
5.2.5	Oportunidades de mejora.....	58
6	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>60</b>
7	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>64</b>
8	<b>ANEXOS A: TABLAS.....</b>	<b>68</b>
9	<b>ANEXOS B: ESQUEMAS .....</b>	<b>79</b>
10	<b>ANEXOS C: PARÁMETROS .....</b>	<b>82</b>
11	<b>ANEXO D: MAPAS.....</b>	<b>84</b>

## ÍNDICE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama ilustrativo de la subdivisión de los recursos geotérmicos base. Modificado de [18] .....	7
Figura 2.2 Diagrama de Mckelvey para recursos geotérmicos base. Fuente [18] .....	7
Figura 2.3 Esquema de funcionamiento de una bomba de calor. Fuente [23] .....	11
Figura 2.4 Componentes básicos de una bomba de calor geotérmica. Fuente [24] .....	12
Figura 2.5 Bomba de calor por compresión en régimen de calentamiento. Fuente [24] .....	13
Figura 2.6 Esquema sistema de extracción abierto. Fuente [24].....	14
Figura 2.7 Intercambiador horizontal simple (izquierda), doble (derecha). Fuente [23].....	14
Figura 2.8 Sistemas cerrados de intercambiadores horizontales en serie y paralelo. Fuente [24] .....	15
Figura 2.9 Sistemas cerrados con intercambiadores horizontales <i>slinky</i> . Fuente [24].....	15
Figura 2.10: Sondas geotérmicas. Fuente [24].....	16
Figura 2.11: Campo de sondas geotérmicas. Fuente[24] .....	16
Figura 2.12 Capacidad de generación eléctrica mundial a partir de energía geotérmica. Elaboración propia a partir de [29] .....	18
Figura 2.13 Capacidad geotérmica instalada de uso directo y utilización anual 1995-2015. Fuente [5] .....	18
Figura 2.14 Comparación de capacidad instalada a nivel mundial de energía geotérmica para el periodo comprendido entre 1995-2015. Fuente [5] .....	19
Figura 2.15 Comparación utilización mundial anual de energía geotérmica para el periodo comprendido entre 1995-2015. Fuente [5].....	20
Figura 2.16 Aplicaciones directa de energía geotermal a nivel mundial en 2015, distribución porcentual en base a capacidad instalada MWt. Fuente [5] .....	20
Figura 4.1 Asignación de parámetros a “Polígono Geología” (Izquierda), Asignación de parámetros a “Polígono Dominios Morfoestructurales” (Derecha) .....	42

Figura 4.2 Esquema general creación mapa mediante el Método volumétrico .....	44
Figura 4.3 Procesamiento de la información Método Volumétrico.....	44
Figura 4.4 Asignación valor de captación de calor específico a “Polígono Geología” .....	46
Figura 4.5 Esquema general creación mapa mediante el Método sHE.....	47
Figura 4.6 Procesamiento de la información Método sHE .....	48
Figura 4.7 Procesamiento de la información Método sHE considerando diferentes escenarios de nivel freático .....	50
Figura 5.1 Mapa Método volumétrico, energía geotérmica extraíble [H <sub>1</sub> ] ROCA 1 (izquierda), ROCA 2 (derecha) .....	52
Figura 9.1 Procesamiento de la información Método Volumétrico.....	79
Figura 9.2 Procesamiento de la información Método sHE.....	80
Figura 9.3 Procesamiento de la información Método sHE considerando diferentes escenarios de nivel freático .....	81
Figura 10.1 Ejemplos de conductividad y capacidad térmica específica de subsuelos. Fuente [6] .....	82
Figura 10.2. Principales valores y rango de variación de conductividad térmica, calor específico y calor específico volumétrico para roca magmática, metamórfica y sedimentaria. Fuente [63] .....	83
Figura 10.1 Mapa flujo de calor.....	84
Figura 11.2 Mapa Método volumétrico, energía geotérmica extraíble [H <sub>1</sub> ] ROCA 1. ....	85
Figura 11.3 Mapa Método volumétrico, energía geotérmica extraíble [H <sub>1</sub> ] ROCA 2. ....	85
Figura 11.4 Mapa Método volumétrico, energía geotérmica extraíble [H <sub>1</sub> ] ROCA 1.....	85
Figura 11.5 Mapa Método volumétrico, energía geotérmica extraíble [H <sub>1</sub> ] ROCA 2.....	85
Figura 11.6 Mapa nivel freático escenario NFNE_A .....	85
Figura 11.7 Mapa nivel freático escenario NFNE_B.....	85
Figura 11.8 Mapa sHE ROCA 1, No saturado 1800 horas/año. ....	85

Figura 11.9 Mapa sHE ROCA 1, Saturado 1800 horas/año. ....	85
Figura 11.10 Mapa sHE ROCA 1, 1800 horas/año escenario NFNE_A .....	85
Figura 11.11 Mapa sHE ROCA 1, 1800 horas/año escenario NFNE_B .....	85
Figura 11.12 Mapa sHE ROCA 1, No saturado 2400 horas/año. ....	85
Figura 11.13 Mapa sHE ROCA 1, Saturado 2400 horas/año. ....	85
Figura 11.14 Mapa sHE ROCA 1, 2400 horas/año escenario NFNE_A .....	85
Figura 11.15 Mapa sHE ROCA 1, 2400 horas/año escenario NFNE_B .....	85
Figura 11.16 Mapa sHE ROCA 2, No saturado 1800 horas/año. ....	85
Figura 11.17 Mapa sHE ROCA 2, Saturado 1800 horas/año. ....	85
Figura 11.18 Mapa sHE ROCA 2, 1800 horas/año escenario NFNE_A .....	85
Figura 11.19 Mapa sHE ROCA 2, 1800 horas/año escenario NFNE_B. ....	85
Figura 11.20 Mapa sHE ROCA 2, No saturado 2400 horas/año. ....	85
Figura 11.21 Mapa sHE ROCA 2, Saturado 2400 horas/año. ....	85
Figura 11.22 Mapa sHE ROCA 2, 2400 horas/año escenario NFNE_A .....	85
Figura 11.23 Mapa sHE ROCA 2, 2400 horas/año escenario NFNE_B .....	85

## ÍNDICE TABLAS

Tabla 3-1 Valores específicos de extracción de calor para intercambiadores geotérmicos. Modificado de norma VDI 4640 [26] .....	32
Tabla 4-1 Clasificación de valores de captación de calor específicos .....	45
Tabla 5-1 Estadísticas principales de los mapas generados con el Método Volumétrico	52
Tabla 5-2 : Comparación de resultados Método Volumétrico área de estudio comuna de Colina. ....	53
Tabla 5-3 Estadísticas generales método sHE para condiciones base en función del tiempo de uso y tipo de roca .....	56
Tabla 5-4 Resumen estadísticos escenarios A y B de nivel freático .....	56
Tabla 8-1 Proyectos a nivel nacional de uso de energía geotérmica. Fuente [35] .....	68
Tabla 8-2 Tipos de concesiones geotérmicas en Chile. Fuente [38].....	70
Tabla 8-3 Coberturas utilizadas para creación de mapa de potencial térmico de baja entalpía.	71
Tabla 8-4 Análisis comparativo de disponibilidad de información para cada metodología	72
Tabla 8-5. Resumen datos ROCA1. Atributo del “Polígono Geología” presente en la cobertura GIS Mapa geológico de Chile escala 1:1.000.000. ....	72
Tabla 8-6. Resumen datos ROCA2. Atributo del “Polígono Geología” presente en la cobertura GIS Mapa geológico de Chile escala 1:1.000.000. ....	73
Tabla 8-7 Valores asignados en tablas de atributos, calor específico Volumétrico y conductividad térmica en función de la litología presente en la variable ROCA1 .....	74
Tabla 8-8 Valores asignados en tablas de atributos, calor específico Volumétrico y conductividad térmica en función de la litología presente en la variable ROCA2 .....	76
Tabla 8-9. Clasificación y asignación de valor de captación de calor específico para las litologías pertenecientes a las variables ROCA1 y ROCA2 en base a procedimiento descrito en la Figura 4.4. ....	77

**NOMENCLATURA**

SERNAGEOMIN	Servicio Nacional de Geología y Minería
DGA	Dirección General de Aguas
GIS	<i>Geographic Information System</i>
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
WGC	<i>World Geothermal Congress</i>
ENAP	Empresa Nacional del Petróleo
GDN	Geotermia del Norte
ENG	Empresa Nacional de Geotermia
CEGA	Centro de Excelencia Geotérmica de los Andes
CGA	<i>Global Geothermal Alliance</i>
SEIA	Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental
DIA	Declaración de Impacto Ambiental
EIA	Evaluación de Impacto Ambiental
UNDP	<i>United Nations Development Program</i>
MINVU	Ministerio de Vivienda y Urbanismo
SEC	Superintendencia de Electricidad y Combustibles
SHE	<i>Specific Heat Exchanger</i>
PDA	Plan de descontaminación ambiental
FOSIS	Fondo de Solidaridad e Inversión Social

# 1 INTRODUCCIÓN

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

## 1.1 Contextualización del problema

Chile posee una gran extensión de zonas con necesidades de calefacción que se cubren en gran medida con el uso de leña y sus derivados. Esto ha traído problemas relacionados con la salud de las personas, contaminación atmosférica y explotación no sustentable de los recursos forestales.

En un escenario internacional de revolución tecnológica, con un aumento sostenido de la demanda energética y una creciente preocupación de la comunidad internacional por reducir la contaminación y las emisiones de gases de efecto invernadero, la política energética de Chile “Energía 2050” plantea la necesidad de poseer un sector energético más confiable, inclusivo, competitivo y sustentable [1]. En este contexto y haciendo énfasis en la sustentabilidad, toma relevancia el estudio, evaluación, desarrollo y uso de energías renovables no convencionales como la energía geotérmica.

La energía geotérmica es aquella que se encuentra bajo el suelo como calor suministrado tanto por fuentes internas (calor radiogénico, calor de formación del planeta, energía liberada durante la creación de corteza, enriquecimiento de metales, fricción generada por terremotos, composición física y química de estructuras) como fuentes externas (radiación solar, energía gravitacional) [2].

Los recursos geotérmicos se clasifican comúnmente en función de su entalpía o temperatura, en 4 tipos: energía geotérmica de muy baja entalpía, baja entalpía, media entalpía y alta entalpía.

Los recursos geotérmicos de media entalpía (90°C-150°C) y alta entalpía (>150°C) se utilizan para la generación de energía eléctrica [3].

Los recursos geotérmicos de muy baja entalpía (0°C – 30°C) y baja entalpía (30°C - 90°C) [4] se utilizan de manera directa o mediante bombas de calor para la climatización de espacios y la obtención de agua caliente sanitaria [5].



La energía geotérmica de muy baja entalpía posee actualmente una tecnología de aprovechamiento directo madura y probada en numerosos países, con una proyección al alza en lo que refiere a la capacidad instalada [5].

La tendencia creciente en el aprovechamiento de recursos de energía geotérmica de muy baja entalpía se debe a que es una energía renovable que permite reducir las emisiones de gases de efecto invernadero sustituyendo a otros combustibles fósiles y madera, y dada su distribución en toda la corteza terrestre contribuye también a reducir la dependencia energética externa. La tecnología actual permite alcanzar ahorros energéticos en climatización de espacios de hasta un 60% frente a otras opciones como el petróleo y un 40% en relación al gas [6]. Estas características le han valido ser considerado un recurso clave en la transición hacia energías limpias en las nuevas metas propuestas por la Comunidad Europea para el año 2030 [7].

El continente europeo tiene un amplio desarrollo en la materia y cuenta con mapas a nivel continental, nacional, regional [8].

En Chile los recursos geotérmicos han contado con muy poca atención en lo que a su estudio y utilización respecta, limitando su uso a fines turísticos, balnearios y piscinas [9].

La ausencia de información o mapas de recursos geotérmicos de muy baja entalpía a escala país en los catálogos de instituciones como el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) y el Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, constituye un problema si lo que se busca es impulsar el uso de este recurso energético. De ahí que el presente trabajo se propone analizar la información pública disponible en los catálogos de instituciones nacionales y realizar una evaluación preliminar del potencial geotérmico.

Por otro lado, la línea metodológica que se plantea, se basó en los múltiples precedentes que hay documentados y que hacen uso de los Sistemas de Información Geográfica (*Geographic Information System – GIS*) para modelar el potencial de energía geotérmica en áreas de España [10], Alemania [11], Italia [12]–[14], Suiza [15] o, Chipre [16], entre otros, con el objetivo de conocer el recurso y promover el uso de esta energía renovable.

## **1.2 Objetivos**

En función del problema descrito se plantean los siguientes objetivos.

### **1.2.1 Objetivos General**

Realizar una evaluación de los recursos geotérmicos de muy baja entalpía y crear mapas a escala regional del potencial geotérmico de muy baja entalpía disponible en el territorio continental de Chile.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

1. Identificar las principales tecnologías de aprovechamiento directo de la energía geotérmica y sus características.
2. Identificar las principales metodologías utilizadas a nivel internacional para la evaluación del potencial geotérmico de un territorio.
3. Identificar los parámetros y variables implicadas en las metodologías de evaluación del potencial geotérmico de muy baja entalpía.
4. Determinar la disponibilidad de información pública adecuada en Chile para aplicar las metodologías de evaluación de potencial geotérmico.
5. Desarrollar una metodología para la evaluación de potencial geotérmico en Chile utilizando un sistema de información geográfica.
6. Determinar las limitaciones en la información disponible y definir líneas de mejora.

## **1.3 Alcances y limitaciones del estudio**

La evaluación de potencial geotérmico que se presenta en este trabajo se elabora exclusivamente en base a información pública disponible en los catálogos del Servicio Nacional de Geología y Minería, Ministerio de Energía y Dirección General de Aguas.

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

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

1. La influencia de la elevación del terreno.

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

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

#### **1.4 Metodología general de trabajo**

La metodología de trabajo consta de 5 etapas que se describen a continuación:

1. **Recopilación de información**  
 Consiste en la recopilación y revisión bibliográfica de los principales estudios que posean relación con la energía geotérmica en Chile y con la elaboración de mapas de potencial geotérmico utilizando sistemas de información geográfica (en adelante GIS). Además, se realizan las gestiones correspondientes para obtener los diferentes datos que serán utilizados para la elaboración de mapas.
2. **Análisis de datos**  
 Se identifican las características de los datos disponibles, su naturaleza y formato. A continuación, son clasificados, filtrados y estandarizados en formatos compatibles con el software ArcGIS. Posteriormente se realiza un análisis preliminar de los datos útiles disponibles en función de las diferentes metodologías propuestas por investigaciones previas a nivel mundial.
3. **Definición del método de evaluación de potencial geotérmico**  
 Se realiza un análisis comparativo entre las diferentes metodologías existentes y se selecciona la más idónea.

---

<sup>1</sup> Corresponde a la suma de vapor de agua hacia la atmósfera desde la superficie del suelo (evaporación) y la transpiración de las plantas.

#### 4. Creación de mapas de potencial geotérmico

Utilizando los datos disponibles y el módulo ArcMap del sistema de información geográfica ArcGIS 10.6.1. (módulo de conversión de datos, Tablas, Excel, Puntos, Polígonos, Ráster, Shapefile; del módulo de manejo de información, características de clases, Puntos, Líneas, Polígonos, Procesamiento Raster, transformación y proyección; y las herramientas de análisis geoespacial Algebra de Mapa, Calculadora Raster, e Interpolación); se obtienen una serie de mapas de potencial geotérmico, que presentan diferentes escenarios de evaluación posibles para el territorio de Chile continental.

#### 5. Validación de resultados

La evaluación de potencial geotérmico de recursos de muy baja entalpia obtenido se compara con las estimaciones locales proporcionadas por investigaciones previas para comprobar si los resultados obtenidos son coherentes. Posteriormente se analizan los resultados y se identifican las oportunidades de mejora.



## 2 ANTECEDENTES

### 2.1 Conceptos generales

La energía geotérmica es la energía contenida en forma de calor al interior de la tierra. El origen de esta energía se relaciona con la estructura, procesos físicos y químicos que ocurren en nuestro planeta. Este calor se mueve constantemente desde el interior de la tierra hasta la superficie donde se disipa hacia la atmósfera terrestre [17]. Una evidencia de este fenómeno es la existencia de un aumento de temperatura en función de la profundidad, que se denomina **gradiente geotérmico** y generalmente es expresado en °C/ km [4] con un promedio a nivel mundial de 30°C/km. Aunque el gradiente geotérmico es variable y depende fundamentalmente de las características geológicas, de los fluidos existentes en el subsuelo y los fenómenos de geodinámica interna que se manifiestan en la zona considerada.

Entender cómo se distribuye la energía geotérmica en nuestro planeta es clave si se busca hacer uso de ella, de ahí que resulte importante comprender la definición de “recurso geotérmico base” como toda la energía térmica en la corteza terrestre debajo de un área específica [18].

Se sabe que los costos de perforación aumentan rápidamente en función de la profundidad, además existen limitaciones tecnológicas en la profundidad máxima que se puede alcanzar, como consecuencia solo la energía térmica en la parte más superficial de la corteza podría ser extraíble en términos económicos y tecnológicos. Por ende, una primera subdivisión de los “recursos geotérmicos base” se refiere a aquellos que son “accesibles” e “inaccesibles” de acuerdo con su profundidad. En relación con los recursos geotérmicos base “accesibles” estos no siempre pueden ser extraídos, incluso bajo los supuestos más optimistas desde el punto de vista tecnológico y económico. De ahí que, existe una clase de recursos geotérmicos de base accesible denominados “útiles” y aquellos que permanecen fuera de esta categoría se denominan “residuales”. Finalmente, los recursos “útiles” a su vez se pueden subdividir en “económicos” o “subeconómicos” haciendo alusión a la energía que puede ser extraída a costos competitivos si se compara con otros recursos energéticos al momento de la evaluación [18].

La clasificación anterior se muestra a continuación de forma esquemática en la Figura 2.1.

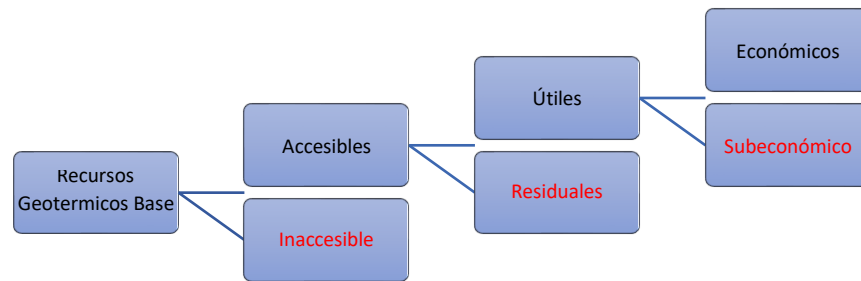


Figura 2.1 Diagrama ilustrativo de la subdivisión de los recursos geotérmicos base.

Modificado de [18]

La subdivisión de recursos geotérmicos base (Figura 2.1), se ilustra mediante un diagrama de Mckelvey [18] (véase, Figura 2.2). Que incorpora el grado de seguridad geológica en el eje horizontal junto a la clasificación de los recursos descrita anteriormente en el eje vertical.

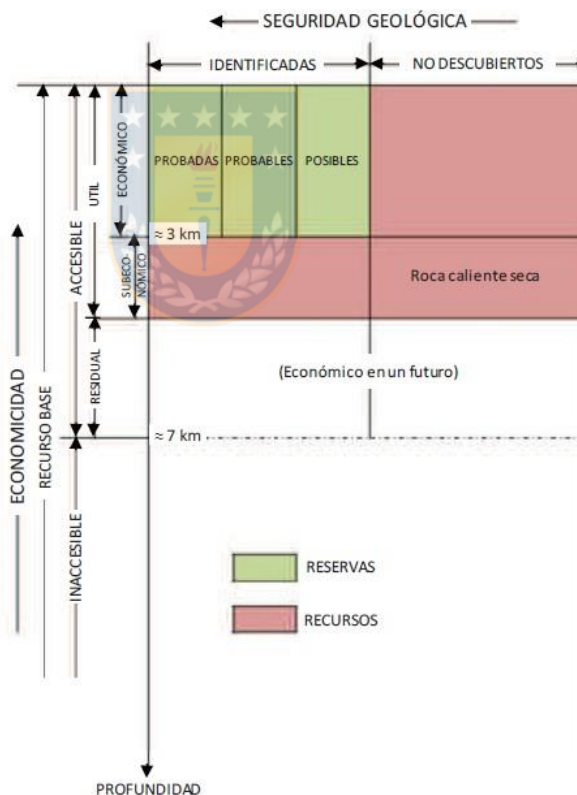


Figura 2.2 Diagrama de Mckelvey para recursos geotérmicos base. Fuente [18]

Según estos criterios, los recursos geotérmicos son aquellos de base accesibles útiles, incluyendo tanto los identificados como los no descubiertos. Es decir, la energía total que podría ser extraída económica y legalmente en un futuro próximo incluyendo las reservas [18].

Se denominan **reservas geotérmicas** a los recursos geotérmicos que pueden ser extraídos de forma económica y legalmente en la actualidad. Las reservas pueden clasificarse en:

- **Reservas probadas:** parte de las reservas que se han evidenciado mediante perforación y medidas directas y que pueden producir energía a coste competitivo en el momento de la evaluación.
- **Reservas probables:** parte de las reservas que han sido puestas de manifiesto mediante investigaciones geológicas, geoquímicas y/o geofísicas, aunque sin llegar a perforar, pero que, de alumbrarse, resultarían productivas a coste competitivos en el momento de su determinación.
- **Reservas posibles:** parte de las reservas cuya existencia está basada solamente en criterios geológicos, pero que, de extraerse, resultarían económicamente competitivas en el momento de su determinación.

Por otro lado, un **yacimiento geotérmico** se define como el área geográfica concreta que posee determinadas condiciones geológicas y geotérmicas favorables para que se puedan explotar de forma económica los recursos geotérmicos del subsuelo. Los yacimientos geotérmicos pueden ser calificados conforme a diferentes criterios: contexto geológico, modo de explotación, rango de temperatura y tipo de utilización. La clasificación más común y que será adoptada en este trabajo, es la clasificación según el rango de temperatura o entalpía del yacimiento [4]. Esta clasificación es la siguiente:

- **Yacimiento de muy baja entalpía:** se consideran aquellos que tiene menos de 30°C, prácticamente la totalidad de la corteza terrestre del planeta constituye un extenso yacimiento de recursos geotérmicos de muy baja entalpía, que se ve interrumpido por la presencia de masas de agua, continentales y marinas.
- **Yacimiento de baja entalpía:** se consideran recursos geotérmicos de baja temperatura, entre 30°C y 90°C, que pueden encontrarse en cuencas sedimentarias en las que el gradiente geotérmico sea igual o ligeramente superior al promedio mundial. La única condición geológica requerida es la existencia a profundidad adecuada, entre 1500 a 2500 metros, formaciones geológicas permeables, capaces de contener y dejar circular los fluidos que permitan extraer el calor de las rocas.

- **Yacimiento de media entalpía:** son yacimientos con recursos geotérmicos a temperaturas comprendidas entre 90°C y 150°C. Se encuentran en numerosos lugares del planeta: en cuencas sedimentarias, como los de baja temperatura, pero a profundidades comprendidas entre los 2000 m y 4000 m; en zonas de adelgazamiento litosférico; en zonas con elevada concentración de isótopos radiactivos; o en los mismos ámbitos geológicos que los yacimientos de alta temperatura, pero a menos profundidad, menos de 1000 m.
- **Yacimiento de alta entalpía:** son aquellos yacimientos con fluidos geotermales, o rocas calientes, a más de 150°C de temperatura. Se encuentran en zonas geográficas restringidas, con gradiente geotérmico extraordinariamente elevado, hasta 30°C cada 100 m. Esas zonas suelen coincidir con la existencia de fenómenos geológicos notables, como actividad sísmica elevada, formación de cordilleras en épocas geológicas recientes, actividad volcánica muy reciente y, principalmente, regiones volcánicas situadas en los bordes de las placas litosféricas. Se suelen explotar a profundidades comprendidas entre 1500 y 3000 m.

## 2.2 Usos de la energía geotérmica

Considerando el hábito de la humanidad de usar aguas calientes naturales para calentar, cocinar o con fines medicinales, no cabe duda, que el uso de la energía geotérmica es antiguo. Pero fue gracias al desarrollo tecnológico que las aplicaciones de la energía geotérmica se ampliaron en número de usos y escala, con dos aplicaciones principales que sustentaron el reconocimiento de la energía geotermia como una fuente de energía global; la producción de energía eléctrica que fue testeada y probada en Toscana (Italia) en el año 1904 y posteriormente escalada a nivel industrial en el año 1913, y la calefacción de distrito geotérmica, concepto nacido en Boise (Idaho, USA) en 1890 siendo posteriormente adoptado en Reykjavik (Islandia) en 1930 [19].

Tanto la generación eléctrica como su uso en calefacción son consideradas revoluciones importantes en el campo de la energía geotérmica y constituyen actualmente una opción importante para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y satisfacer las exigentes demandas energéticas de electricidad y calor residencial [19].



La generación de electricidad a partir de energía geotérmica se desarrolla transformando los fluidos de alta temperatura en energía eléctrica, para ello se utilizan diferentes ciclos de vapor-directo, flash o binario definidos en función de las características del yacimiento [2,3,19–22].

El presente estudio se enfoca principalmente en los recursos geotérmicos de muy baja entalpía y no se ahondará en mayor detalle el funcionamiento de las tecnologías de aprovechamiento geotérmico para producción de energía eléctrica.

### **2.3 Tecnologías de aprovechamiento directo de los recursos geotérmicos**

La transferencia de calor ocurre siempre desde el foco caliente al más frío. Sin embargo, una bomba de calor acoplada a un sistema de captación geotérmica permite extraer calor desde un foco frío (terreno), para cederlo a un foco caliente (espacio a climatizar o depósito de agua caliente sanitaria).

La bomba de calor y el sistema de captación que se acopla al terreno, constituyen las principales tecnologías necesarias para el aprovechamiento directo de la energía geotérmica y su factibilidad depende principalmente de las características geológicas e hidrogeológicas del yacimiento, pues determinan el diseño del sistema de captación geotérmica.

#### **2.3.1 Bomba de calor geotérmica**

La bomba de calor geotérmica es una máquina térmica que transfiere el calor desde un foco frío a otro caliente utilizando una cantidad de trabajo pequeña. La ventaja que poseen las bombas de calor frente a otros sistemas de calefacción radica en la capacidad que posee para aprovechar la energía existente en el terreno (foco frío), y que permite calefaccionar las dependencias interiores de una vivienda o construcción (foco caliente) con una aportación pequeña de energía eléctrica que es necesaria para su funcionamiento [23].

La bomba de calor geotérmica también, permite realizar la transferencia de calor en sentido inverso (véase Figura 2.3), es decir desde la dependencia que requiere frío hacia el terreno que se encuentra a una temperatura superior, en este caso la bomba de calor trabaja en modo de refrigeración [3].

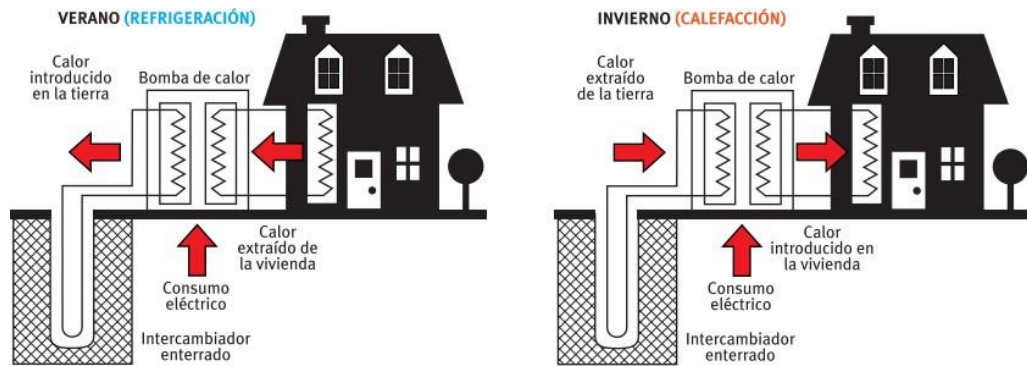


Figura 2.3 Esquema de funcionamiento de una bomba de calor. Fuente [23]

La eficiencia de la bomba de calor se expresa por medio del coeficiente de operación, conocido por sus siglas COP del inglés *Coefficient Of Performance* y que se define como el cociente entre la energía térmica útil obtenida de la máquina y la energía eléctrica que dicha máquina ha consumido en el proceso.

Si se considera la bomba como productora de frío, el COP determina su eficiencia de refrigeración, mientras que, si se considera como productora de calor, se obtendrá la eficiencia de calefacción.

$$COP_{calefacción} = \frac{P_{calefacción}}{P_e} \quad (1)$$

$$COP_{refrigeración} = \frac{P_{refrigeración}}{P_e} \quad (2)$$

Donde

$P_{calefacción}$  = Potencia térmica o calor total cedido al foco caliente [kWt]

$P_{refrigeración}$  = Potencia térmica o calor total extraído del foco caliente [kWt]

$P_e$  = Potencia eléctrica consumida en la operación por la bomba de calor [kWe]

Si una instalación de calefacción funciona adecuadamente, se tiene un valor de COP alto, esto implica que la bomba de calor está consumiendo poca electricidad en proporción al calor total cedido al sistema de calefacción y la mayor parte de la energía se obtiene del terreno.

La bomba de calor de uso más extendido está basada en ciclos de compresión de un fluido refrigerante; sus componentes esenciales son los siguientes:

- **El refrigerante:** es la sustancia que circula por la bomba de calor y que se encarga, alternativamente, de la absorción, transporte y liberación del calor.
- **El evaporador:** es un intercambiador de calor en cual el refrigerante absorbe el calor de su entorno y se evapora transformándose en gas.
- **El compresor:** utilizando energía eléctrica comprime las moléculas del gas refrigerante, incrementando la temperatura del gas.
- **El condensador:** es un intercambiador de calor en el cual el refrigerante cede calor a su entorno y se condensa transformándose en líquido.
- **La válvula de expansión:** reduce la presión del refrigerante, el cual se expande reduciendo su temperatura.

En la Figura 2.4 se muestra un esquema sencillo de los componentes descritos anteriormente y el funcionamiento de la bomba de calor: La Figura 2.5 muestra esquemáticamente el funcionamiento de una bomba de calor en régimen de calentamiento, la que posee un COP = 4,5 suministrando al espacio a climatizar una potencia térmica de 4,5 kWt, mientras que la potencia eléctrica consumida en el proceso es de 1 kWe, por lo tanto 3,5 kWt es la potencia geotérmica renovable obtenida del terreno [24].

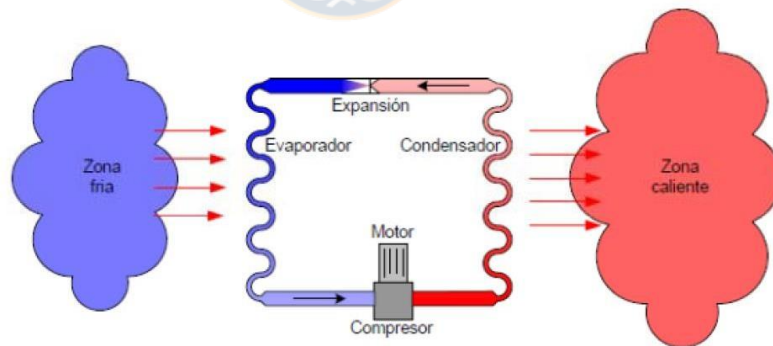


Figura 2.4 Componentes básicos de una bomba de calor geotérmica. Fuente [24]

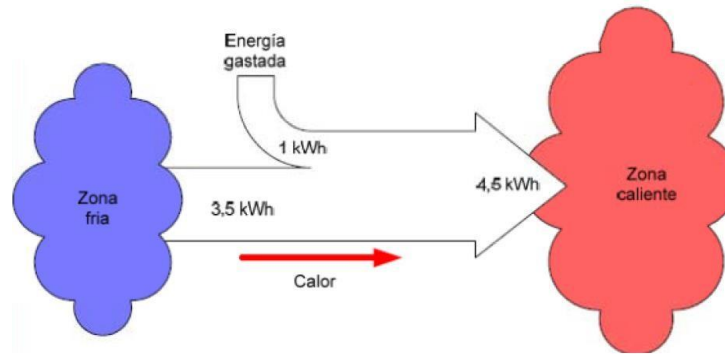


Figura 2.5 Bomba de calor por compresión en régimen de calentamiento. Fuente [24]

### 2.3.2 Sistemas de captación geotérmica

Las bombas de calor se conectan al subsuelo mediante diferentes sistemas de captación que son capaces de extraer el calor contenido en este mediante el movimiento de un fluido por un circuito en contacto con el terreno.

Las captaciones pueden clasificarse en función del tipo de circuito utilizado para llevar a cabo el intercambio de calor con el terreno en sistemas abiertos o cerrados, y según la geometría del dispositivo de la captación en el terreno en horizontales o verticales.

**Sistemas abiertos:** se caracterizan principalmente porque realizan la captación de agua de un acuífero, para intercambiar calor con ella y una vez realizado el intercambio el recurso hídrico se devuelve al entorno.

Estos sistemas constan, de un pozo de producción encargado de captar el recurso hídrico, y un sistema de inyección o vertido. La Figura 2.6 (izquierda) muestra un sistema de captación abierto con un pozo de producción y otro de inyección y (derecha) un sistema de captación abierto con un pozo de producción y vertido a un río.

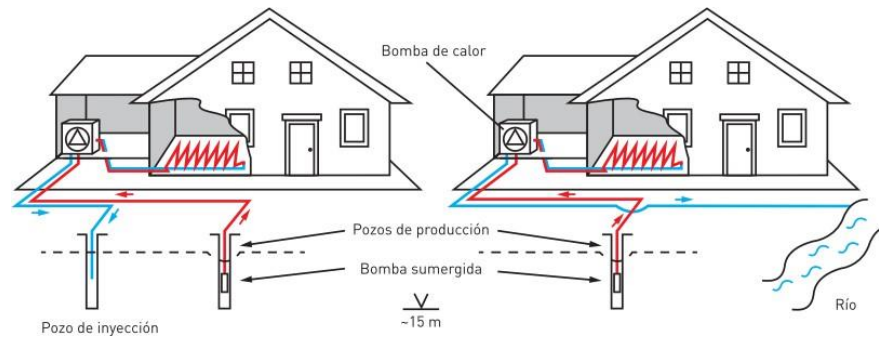


Figura 2.6 Esquema sistema de extracción abierto. Fuente [24]

**Sistemas cerrados:** se caracterizan por emplear colectores o intercambiadores de calor introducidos en el terreno. Por el interior de los intercambiadores circula un fluido caloportador y este es el responsable de transportar la energía captada del subsuelo a la bomba de calor y viceversa [23–26].

**Sistemas horizontales:** emplean colectores en circuito que se disponen a poca profundidad del suelo. Existen diferentes tipos de configuración para los intercambiadores horizontales. Según el número de tuberías pueden ser simples, dobles, triples, etc. (Figura 2.7) y según la trayectoria del fluido se clasifican en intercambiadores en serie o paralelo (Figura 2.8).

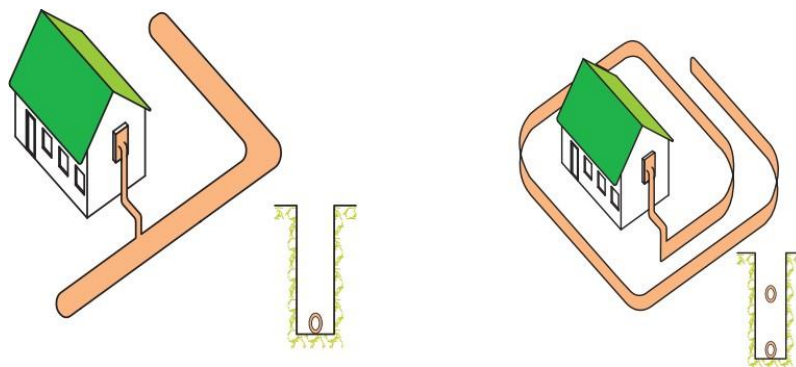


Figura 2.7 Intercambiador horizontal simple (izquierda), doble (derecha). Fuente [23]

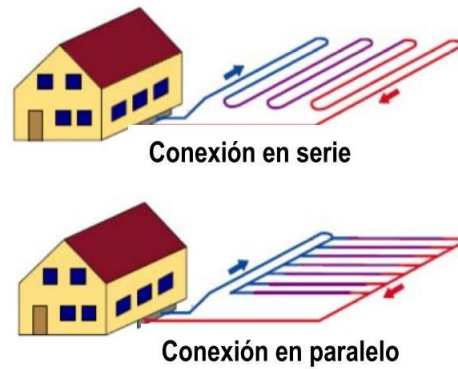


Figura 2.8 Sistemas cerrados de intercambiadores horizontales en serie y paralelo. Fuente [24]

Una variante en el diseño de intercambiadores horizontales, es la configuración tipo *slinky*, variante que consiste en disponer de una tubería formando bucles horizontales, otra variante son los colectores horizontales en espiral vertical, ambas variantes tienen el objetivo de instalar la mayor longitud de intercambiador en la menor superficie disponible de terreno (Figura 2.9).



Figura 2.9 Sistemas cerrados con intercambiadores horizontales *slinky*. Fuente [24]

Normalmente los sistemas cerrados horizontales poseen costes inferiores a lo verticales, pues no suponen la perforación de pozos, pero presentan la desventaja de necesitar una amplia superficie, además de estar sometidos a las variaciones de temperatura y humedad debido a la influencia del clima en estos primeros metros de la superficie del terreno.

**Sistemas verticales:** pueden ser sistemas abiertos o cerrados. Los cerrados consisten en colectores o intercambiadores verticales que requieren la perforación de sondeos de diámetro (entre 10 a 20 cm) y profundidades variables (entre 60 a 200 m). En ellos se introducen uno o varios tubos, por donde circula el fluido caloportador. Este tipo de dispositivos verticales de captación de calor se denominan **sondas geotérmicas** (Figura 2.10) [23–26].

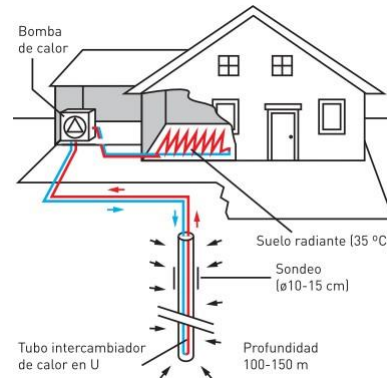


Figura 2.10: Sondas geotérmicas. Fuente [24]

La transferencia de calor entre el fluido caloportador y el terreno depende de la disposición del circuito, de las temperaturas del fluido y el terreno y de las propiedades térmicas de los distintos materiales implicados en el proceso (fluido, colector y terreno). Otros factores que inciden en la energía geotérmica captada por los intercambiadores son la circulación de agua subterránea, la percolación de agua lluvia y el material de relleno del sondeo.

En el caso de precisar mucha energía, es posible emplear campos de sondas geotérmicas, de número y profundidades variables según las condiciones geológicas e hidrogeológicas de la zona (Figura 2.11).

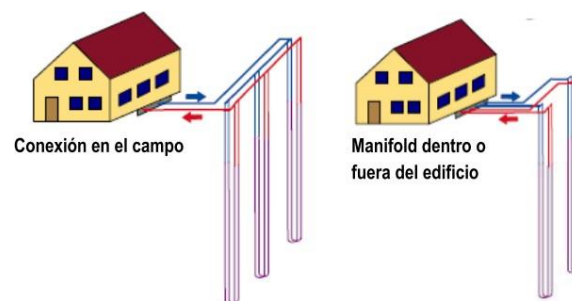


Figura 2.11: Campo de sondas geotérmicas. Fuente[24]

En relación con los colectores que se instalan al interior del sondeo estos poseen distintas configuraciones, que se ajustan a los siguientes tipos básicos:

**Tubos en U:** sistema de captación que consiste en un par de tubos unidos en su base mediante un codo de 180°, cuyas salidas se encuentran conectadas al circuito primario de la bomba de calor. Dependiendo del diámetro de perforación, es posible instalar hasta cuatro de estos pares de tubos en U. Existe además la posibilidad de aumentar el recorrido de los tubos a

lo largo de varias sondas geotérmicas. Esta configuración permite alcanzar costes competitivos que posicionan a estos sistemas como los más utilizados en Europa actualmente [23–26].

**Tubos coaxiales:** Sistema de captación que consta de dos tubos concéntricos de diferente diámetro que se encuentran conectados al circuito primario de la bomba de calor.

Otro sistema utilizado son los pilotes geotérmicos o cimentaciones termoactivas, que consisten en una variación de los sistemas cerrados, que aprovecha la estructura de cimentación de los edificios para captar y disipar la energía térmica en el terreno. Una de las ventajas que poseen los pilotes geotérmicos es el ahorro al implementarse durante la construcción del edificio. Sin embargo, posee la desventaja de que resulta prácticamente imposible reparar los captadores en el caso de sufrir algún daño [23–26].

Existen otros sistemas de captación que pueden ser clasificados específicamente por sus características diferenciadoras. Tal es el caso de las captaciones de aprovechamiento geotérmico de aguas de mina y túneles. Que utilizan aguas subterráneas procedentes de grandes obras de túneles o minas que atraviesan macizos. Un ejemplo de esto ocurre en Suiza [27], donde el agua proveniente de los túneles ferroviarios se utiliza para la climatización de apartamentos o las minas abandonada en Heerlen, Países bajos [28].

La elección final del sistema de captación depende principalmente de las características geológicas e hidrogeológicas, las dimensiones y uso de la superficie disponible de terreno, la demanda de calefacción y refrigeración, y la viabilidad económica.

## 2.4 Estado actual de la explotación geotérmica a nivel mundial

Según se informa en las estadísticas de capacidad renovable 2019 de la *International Renewable Energy Agency* (IRENA) [29], la capacidad máxima de generación neta de electricidad a partir de recursos geotérmicos ha aumentado de forma sostenida en la última década (véase Figura 2.12). El valor más actualizado fija en 13.329 MWe la capacidad de generación máxima de las plantas a nivel mundial que producen electricidad a partir de energía geotérmica.



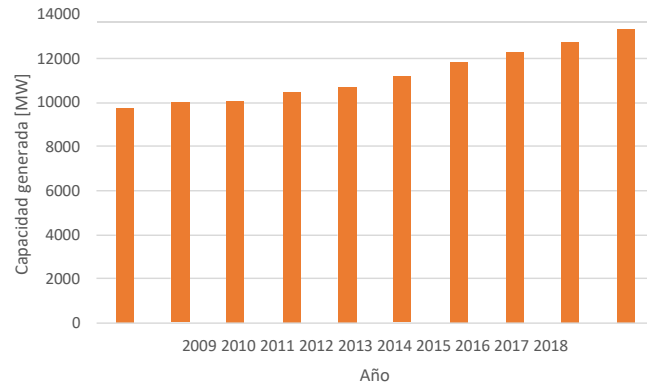


Figura 2.12 Capacidad de generación eléctrica mundial a partir de energía geotérmica.

Elaboración propia a partir de [29]

De la misma forma, tanto la capacidad instalada como el uso directo de los recursos geotérmicos han aumentado de forma continua durante los últimos años. Así lo muestran las cifras entregadas en el *World Geothermal congress 2015* (en adelante WGC2015) [5] donde se fija en 79.329 MWt la capacidad total instalada y en 587.786 TJ el uso directo de los recursos geotérmicos a nivel mundial. Estos valores representan un 45% y 35% de aumento respectivamente si se comparan a los establecidos en el *World Geothermal congress 2010* (en adelante WGC2010).

La Figura 2.13 muestra el crecimiento continuo que han experimentado tanto la capacidad instalada como el uso anual de la energía geotérmica en el periodo comprendido entre 1995 a 2015.

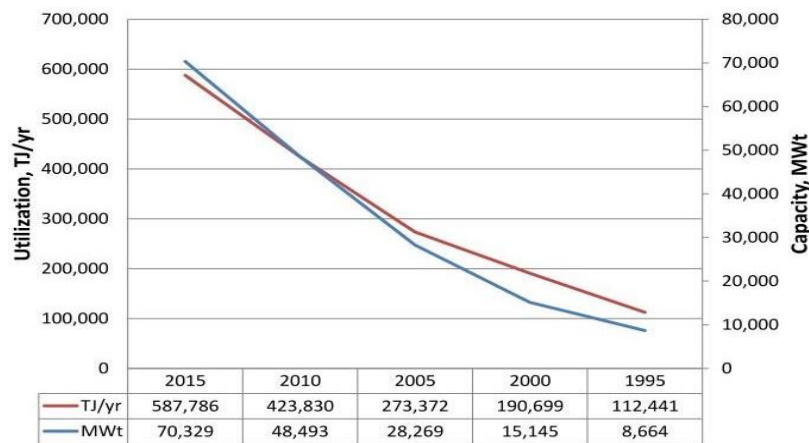


Figura 2.13 Capacidad geotérmica instalada de uso directo y utilización anual 1995-2015.

Fuente [5]

En función de la distribución por países de la capacidad instalada y uso directo de la energía geotérmica entregados por el WGC2015 [5] se puede concluir que quienes lideran en capacidad instalada medida en MWt son Estados Unidos, China, Suecia, Alemania y Francia, mientras con respecto al uso anual de energía geotérmica medida en TJ/año son China, Estados Unidos, Suecia, Finlandia y Canadá.

El WGC2015 presentó también una categorización detallada de la capacidad mundial instalada y la utilización mundial de la energía geotérmica (véase Figura 2.14 y Figura 2.15) donde se constata que los principales usos que esta tecnología posee son las bombas de calor geotermal, climatización de edificios o viviendas, climatización de invernaderos, piscicultura, secado de productos agrícolas, usos industriales, climatización de piscinas para nadar, y derretimiento de nieve. Todos estos usos se basan en la explotación directa de los recursos geotérmicos de baja y muy baja entalpía, donde destaca principalmente el uso de la bomba de calor geotérmica, que con un el 70,9% de la capacidad instalada a nivel mundial (véase Figura 2.15) es el principal medio de explotación directa de los recursos geotérmicos.

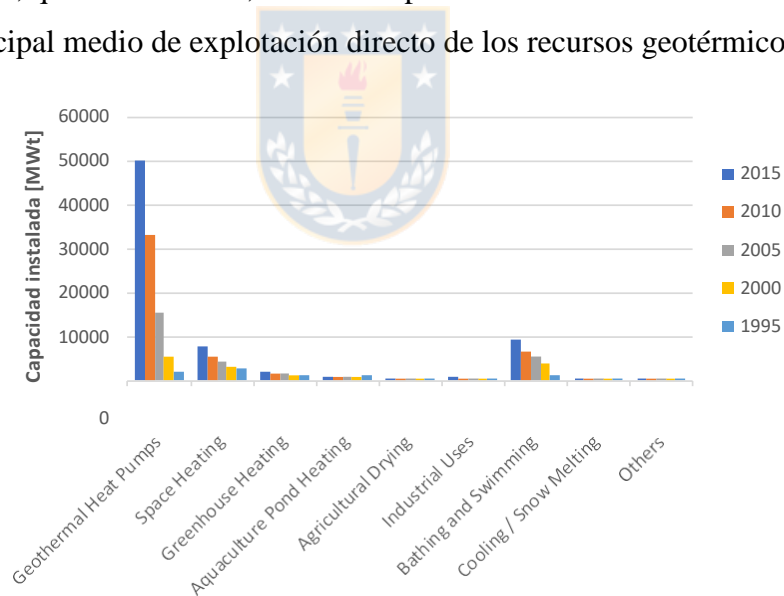


Figura 2.14 Comparación de capacidad instalada a nivel mundial de energía geotérmica para el periodo comprendido entre 1995-2015. Fuente [5]

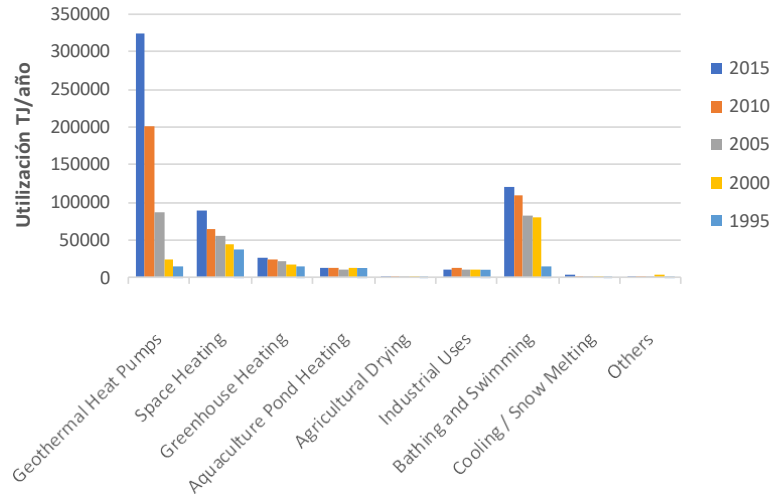


Figura 2.15 Comparación utilización mundial anual de energía geotérmica para el periodo comprendido entre 1995-2015. Fuente [5]

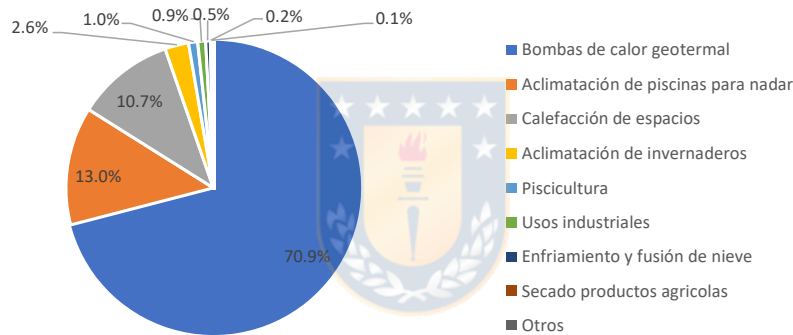


Figura 2.16 Aplicaciones directa de energía geotermal a nivel mundial en 2015, distribución porcentual en base a capacidad instalada MWt. Fuente [5]

## 2.5 Estado Actual de la explotación de energía geotérmica en Chile

La exploración de la energía geotérmica en Chile comenzó en el año 1921 en el Tatio, donde un ingeniero italiano llamado Ennio Tocchi, con experiencia en Larderello (Italia), inicio el primer programa de exploración geotermal en el país. Sin embargo, la ausencia de apoyo técnico y económico finalmente obligaron a detener la exploración [30].

En 1960, el estado de Chile con asistencia del Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas y la Agencia de Cooperación Internacional de Japón promovería la investigación de la zona norte del país con el objetivo de suministrar energía eléctrica para la creciente industria minera. Con la creación del comité chileno de uso geotérmico se dio inicio a la exploración detallada de los campos geotermales de El Tatio y Puchuldiza, concluyendo que las plantas geotérmicas de producción eléctrica son factibles desde el punto de vista técnico y económico

[31]. Posteriormente en el año 1978 se desarrolló un proceso de licitación internacional del campo geotérmico El Tatio que nunca fue completado, debido a cambios experimentados en el país. La exploración geotermal disminuyó para detenerse casi por completo cuando el comité fue disuelto en 1983.

La capacidad de generación eléctrica aproximada para la zona norte de Chile como resultado de la utilización de recursos geotermales se estima en 1300 MWe [32].

Si bien disminuyeron las exploraciones de recursos geotérmicos en el país, durante la década de 1990 se desarrollaron algunas exploraciones lideradas principalmente por la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP) y otras compañías privadas; pero ante la ausencia de un marco regulatorio adecuado no se llegaron a desarrollar proyectos geotérmicos.

Bajo este contexto en el año 2000 finalmente se aprueba la ley 19.657 sobre concesiones de energía geotérmica, en la que se establece la existencia de un marco legal que tiene por objetivo promover el desarrollo de proyectos geotérmicos en el país.

La exploración geotérmica ha sido paulatinamente reactivada desde entonces, con investigaciones lideradas por instituciones nacionales que buscan promover e incrementar el conocimiento sobre la geotermia en Chile tales como: el Centro de Excelencia Geotérmica de los Andes (CEGA) y el SERNAGEOMIN.

Uno de los principales hitos en el desarrollo de la energía geotérmica en Chile ocurrió en septiembre del 2017, en el sistema geotérmico de Cerro Pabellón, que se localiza en la región de Antofagasta a 100 km al NE de la ciudad de Calama, a una altitud de 4500 m.s.n.m. Allí la concesión geotérmica propiedad de Geotérmica del Norte S.A. (GDN) y la Empresa Nacional de Geotermia (ENG) empresa conjunta entre ENEL Latinoamérica y la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP), pusieron en marcha la única planta geotérmica de generación eléctrica a escala comercial que opera actualmente en Sudamérica, con una capacidad instalada de 48 MWe [33].

Según cifras de la *Global Geothermal Alliance* (GGA) [34], Chile al año 2018 tiene una capacidad geotérmica instalada para producción eléctrica de 48 MW, lo que representa solo un 0.2% de la capacidad total instalada para la producción eléctrica. Mientras el uso directo de la energía geotérmica alcanza los 63,79 GWh.

Si bien la mayor parte de la capacidad instalada a nivel nacional se relaciona con el turismo y las aguas termales, se contabiliza un total de 35 proyectos (véase ANEXOS A: Tablas, Tabla 8-1) distribuidos a nivel nacional, que aprovechan los recursos geotérmicos de muy baja entalpía [35,36].

## 2.6 Barreras en la explotación de la energía geotérmica en Chile

Diferentes estudios e investigaciones [31,32,37–40] relacionados con la energía geotérmica en Chile constatan la existencia de varios factores responsables del lento desarrollo de esta industria en el país. Estos estudios identifican barreras legislativas, económicas, institucionales, sociales, de capacitación profesional y arquitectónicas.

Las barreras legislativas radican principalmente en la Ley N°19.657 sobre Concesiones de Energía Geotérmica. Estas han sido analizadas por el CEGA en 2018 [38], donde el abogado especialista en legislación ambiental Miguel Saldivia realizó un análisis comparativo de la legislación sobre energía geotérmica en 15 países (Argentina, Bolivia, Colombia, Costa Rica, Chile, Ecuador, Filipinas, Indonesia, Islandia, Italia, Kenia, México, Nueva Zelanda, Perú y Turquía) y concluye que Chile posee deficiencias en la legislación a nivel de definición, concesiones, usos, impacto ambiental, aprovechamiento de agua y participación ciudadana.

**Definición:** la ley N°19.657 sobre Concesiones de Energía Geotérmica define esta energía como “aquella que se obtenga del calor natural de la tierra, que puede ser extraída del vapor, agua, gases, excluidos los hidrocarburos, o a través de fluidos inyectados artificialmente para este fin” (Artículo 3, Ley N°19.657). También señala que la energía geotérmica, cualquiera sea el lugar, forma o condiciones en que se manifieste, es un bien del estado, susceptible de ser explorada y explotada, previo otorgamiento de una concesión (Artículo 4, Ley N°19.657).

Esta definición no menciona los diferentes tipos de recursos geotérmicos, en función de su temperatura y no establece regulaciones específicas. Los recursos geotérmicos de muy baja entalpía no están definidos en la ley.

**Concesiones:** la legislación establece un modelo con dos tipos de concesiones geotérmicas (véase ANEXOS A: Tablas, Tabla 8-2) las de exploración y explotación. Este tipo de regulación solo contempla los recursos para producción eléctrica y no es adecuado para fomentar la explotación de recursos de muy baja entalpía.

El modelo basado en concesiones de exploración y explotación es compartido por la mayoría de los países estudiados [38] aunque existen diferencias en los plazos que se definen para cada una de las concesiones. En el caso particular de Chile la duración de 2 años para concesiones de exploración se considera insuficiente, dado que las áreas de interés para la producción eléctrica (objetivo de la ley N°19.657) suelen localizarse en zonas de difícil acceso, como la cordillera de los Andes, donde existen condiciones climáticas extremas que disminuyen el tiempo efectivo para realizar los estudios. Las concesiones de explotación, en cambio poseen un plazo indefinido, y no de 30 años máximo como se establece en las legislaciones de los países comparados en el análisis.

**Usos:** la ley no hace distinción entre diferentes tipos de recursos geotérmicos, y no define un marco regulatorio específico aplicable a los recursos de muy baja entalpía. La ley 19.657 tiene un enfoque exclusivo a la regulación de la energía geotérmica para producción eléctrica. Al no existir mención alguna sobre los recursos geotérmicos de baja o muy baja entalpía en la Ley N°19.657, no existe claridad en si se puede explotar el recurso con fines no eléctricos o si esto constituye una ilegalidad.

**Impacto ambiental:** los proyectos o actividades que se encuentran tipificados en el Artículo 10 de la ley N°19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente deben ser sometidos al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) corresponde al procedimiento administrativo, que determina si un proyecto o actividad se ajusta a la normativa vigente en Chile.

Actualmente la geotermia no se menciona expresamente en la regulación ambiental, por lo tanto, un proyecto solo está obligado de forma indirecta a someterse al SEIA en situaciones puntuales que se establecen en el Artículo 11 de la ley N°19.300 y que corresponden a: la instalación de generadoras de energía mayores a 3W y la ejecución de obras o actividades en parques nacionales, reservas, monumentos, santuarios de la naturaleza, parques marinos, reservas marinas o áreas bajo protección oficial.

Como consecuencia de lo anterior solo un proyecto geotérmico para generación eléctrica estaría obligado a someterse al SEIA y esto solo ocurriría en las etapas finales del proyecto, cuando la instalación de la generadora es inminente.

**Aprovechamiento del agua:** sobre el uso del agua y de acuerdo con lo que se establece en la Ley N°19.657 el titular de la concesión tiene, en la medida necesaria para el ejercicio de la concesión, el derecho de aprovechamiento consuntivo y de ejercicio continuo, de las aguas subterráneas alumbradas de los trabajos de exploración o explotación. Este derecho es inherente a la concesión y se extingue solo cuando acaba dicha concesión.

Según el informe realizado por Miguel Saldivia [38], Chile es el único país donde no se aborda el posible conflicto asociado al uso del agua.

Este punto en particular resulta polémico, pues da paso a que empresas de otros sectores generen un mercado especulativo de concesiones geotérmicas, que tengan como fin poder obtener derechos de aprovechamientos de agua, los cuales incluso se pueden superponer a los derechos que posean terceros. Sin lugar a duda un tema muy sensible actualmente dada la sequía que afecta al país. Esto además puede causar daños a la imagen pública sobre los recursos geotérmicos y generar rechazo por parte de las comunidades.

**Participación ciudadana:** en la Ley N°19.300 que establece mecanismos de participación específicos de la comunidad en el procedimiento de evaluación ambiental de un proyecto que ingrese al SEIA, el cual como se analizó anteriormente no es obligatorio para los proyectos que se relacionan con energía geotérmica salvo las excepciones anteriormente mencionadas. Por lo tanto, esto implica que la participación ciudadana no se encuentra garantizada.

Con fecha 16 de abril de 2019 hace ingreso a la cámara de diputadas y diputados de Chile un proyecto de ley que modifica la ley N°19.657 sobre concesiones de energía geotérmica para el desarrollo de proyectos de aprovechamiento somero de energía geotérmica. El proyecto es categorizado de “suma urgencia” y tiene como propósito fundamental:

- Establecer un sistema de registro de aprovechamiento somero de energía geotérmica, excluyéndolo del régimen concesional.
- La modificación del régimen de fiscalización.
- El establecimiento de estándares generales de seguridad para los usos de la energía geotérmica.

En líneas generales según el boletín N°12.546-08 [41] este proyecto de ley establece una serie de modificaciones que reconocen la existencia del “aprovechamiento somero de la energía geotérmica”, estableciendo que podrá desarrollarse sin la necesidad de obtener una concesión, pero deberá inscribirse en el registro de aprovechamiento somero de energía geotérmica que se creará para esos fines.

Se dispone además que será responsabilidad del Ministerio de Energía diseñar y elaborar la normativa sectorial, que establecerá las condiciones de seguridad para las instalaciones geotérmicas en lo referente a la prevención y control de riesgo sobre la vida, salud y seguridad de las personas, así como el resguardo de la sostenibilidad del recurso geotérmico, la protección de las instalaciones e infraestructura. Se propone además que la labor de fiscalización se encuentre a cargo de la Superintendencia de Electricidad y Combustible (SEC) [41].

El proyecto de ley corrige muchas de las barreras legislativas y fue aprobado en general por unanimidad por los diputados presentes en la sesión del día 20 de noviembre 2019, continuando su tramitación en las diferentes comisiones a la espera de su promulgación y publicación oficial que se espera sea durante el año 2020.

En cuanto a las barreras económicas, el gobierno de Chile actualmente no ofrece ninguna clase de incentivos económicos que impulsen el desarrollo de proyectos geotérmicos de generación eléctrica a nivel de exploración o explotación. El alto riesgo asociado a los proyectos, su localización extrema y alta inversión constituye una barrea a la hora de extender el uso de esta clase de recursos en el país [31].

Sin embargo, en el caso de la explotación de energía geotérmica de muy baja entalpía actualmente se dan una serie de circunstancias que facilitan y fomentan su desarrollo por parte del gobierno de Chile, destacándose el subsidio del plan de descontaminación ambiental (PDA) [42], del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). Este subsidio tiene como objetivo cofinanciar el reacondicionamiento térmico de viviendas, que corresponde a la etapa inicial con la finalidad de mejorar la eficiencia energética y fomentar el uso de energías renovables en las viviendas. Además, se destaca el Fondo de Solidaridad e Inversión Social (FOSIS), específicamente su programa innova FOSIS [43], a través del cual se puede acceder a financiamiento para el pilotaje de proyectos de innovación, siendo uno de los 3 ejes principales de la convocatoria realizada durante el año 2019 proyectos enfocados en fomentar de manera



sostenible el acceso a agua caliente sanitaria y calefacción de las familias vulnerables, categoría en la cual se enmarcan las tecnologías de aprovechamiento directo de recursos geotérmicos de muy baja entalpía.

Desde el punto de vista de las barreras institucionales, no existe actualmente por parte del gobierno un plan asociado al desarrollo de la energía geotérmica. Lo anterior se ve reflejado en la política energética de Chile “energía 2050” [1] donde la meta propuesta de alcanzar una generación con al menos un 70% de energías renovables al año 2050 se centran en proyectos eólicos y solares. Esta clara falta de dirección en el rol que desempeña la energía geotérmica en el país constituye una barrera importante para su desarrollo[31].

Por otra parte, en el contexto de las barreras de capacitación profesional, se debe destacar que hay pocos profesionales formados en el ámbito de la geotermia [31]. Las universidades del país no cuentan con programas académicos asociados con energía geotérmica (Solo la universidad de Chile consta con el curso “Principios de la Geotermia” y el electivo “Alteraciones en sistemas geotermiales” dirigido solo a estudiantes de geología) y los centros de investigación como el Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) fueron recientemente creados.

Esta ausencia de profesionales también tiene un impacto sobre los diferentes proyectos de exploración y explotación asociados a la energía geotérmica, ya que es necesario contratar profesionales extranjeros para su desarrollo.

En cuanto a las barreras sociales, la aceptación social es necesaria para desarrollar cualquier proyecto en el país y en este contexto la energía geotérmica es menos conocida que otras energías renovables como la solar o la eólica. Además, algunos estudios [39,42] indican que la percepción social negativa de la geotermia en nuestro país, es debida al accidente ocurrido en el año 2009 en el campo geotermal El Tatio. En el cual, durante el desarrollo de pruebas en antiguos pozos de exploración tuvo lugar una descarga no controlada de vapor durante 27 días que alcanzó los 60 metros de altura. Este hecho fue catalogado por los medios de prensa como un desastre ecológico, y se promovió una visión negativa de la energía geotérmica.

Por otra parte, la falta de conocimiento sobre los beneficios de la geotermia de muy baja entalpía, del funcionamiento de las instalaciones, de la tecnología que utilizan, el su bajo

impacto ambiental, sus beneficios económicos constituyen una barrera de entrada y resulta fundamental promover y divulgar el conocimiento sobre este tipo de energía al público general.

Por último, son de especial relevancia las barreras arquitectónicas que se presentan en las edificaciones de Chile. Según el CENSO 2017 [45] hay 5.167.728 casas y 1.138.062 departamentos en edificios. Estas viviendas presentan diversos materiales de construcción desde hormigón armado, cemento, acero, ladrillo, piedra, madera, adobe y barro. La diversidad de materiales de construcción empleados, los deficientes aislamientos térmicos y el hecho de que las construcciones no están diseñadas para facilitar el uso de instalaciones de climatización geotérmicas, constituye una barrera de entrada de la geotermia. Debido a esto, las tecnologías de aprovechamiento deben adaptarse a los diferentes tipos de construcciones existentes, que no fueron diseñadas para hacer uso de ella. Si bien desde el año 2014 el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) [46] presentó los nuevos estándares de construcción sustentable, que buscan fomentar la eficiencia energética de las construcciones chilenas y el uso de energías renovables, estos estándares son de carácter voluntario.



### 3 Evaluación de recursos geotérmicos

#### 3.1 Conceptos previos

El calor específico es la propiedad física que describe la capacidad de almacenar calor de una sustancia y se expresa en  $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ . En el caso particular del agua su calor específico es alto aproximadamente de  $4180 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , mientras que para la mayoría de los minerales formadores de rocas este fluctúa entre los  $750 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  y  $1000 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  [47]. El calor específico puede ser expresado por unidad de volumen denominándose calor específico volumétrico o capacidad térmica volumétrica. En el caso del agua este valor es de  $4,18 \text{ MJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ , mientras que para las rocas este posee valores en un rango de  $2 - 2,4 \text{ MJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ .

La conductividad térmica es una propiedad física que describe la capacidad de un material para transferir calor por conducción, como describe la ley de Fourier:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } T = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3)$$

Donde  $q$  es el flujo de calor,  $\lambda$  es la conductividad térmica y  $\frac{\partial T}{\partial x}$  es el gradiente de temperatura. El signo menos en la ecuación se debe al hecho que el flujo de calor se mueve en sentido opuesto al gradiente de temperatura.

En el caso de las rocas la conductividad térmica depende de su temperatura, presión, porosidad y la composición de los fluidos o gases que rellenan los poros[47].

#### 3.2 Factores de interés

La evaluación de recursos y reservas tanto de minerales como de combustibles fósiles ha sido ampliamente aplicada a lo largo del último siglo, pero la valoración del potencial geotérmico constituye un campo de investigación más reciente [3].

Las metodologías utilizadas para la evaluación de recursos geotérmicos están condicionadas por diferentes factores que se agrupan en:

- **Factores geológicos e hidrogeológicos**, como son la distribución y tipos de rocas, las propiedades térmicas de las rocas, su porosidad y permeabilidad, la circulación de fluidos, la profundidad y la temperatura en el subsuelo y la superficie.

- **Factores tecnológicos** debidos a las limitaciones de las tecnologías de perforación, tecnologías de explotación del yacimiento, tecnologías de conversión de la energía térmica y de utilización.
- **Factores económicos** relativos a los costes de exploración, costes de explotación, precios de la energía convencional, frente al valor de la propia energía geotérmica.
- **Factores legales e institucionales** referentes a la legislación aplicable, el fomento al desarrollo de energías renovables y los aspectos ambientales.

Las metodologías que se evalúan en este trabajo están basadas exclusivamente en factores geológicos e hidrogeológicos, y son 4: Método Volumétrico, Método del flujo térmico superficial, Método de sHE (*specific heat extraction*) y el Método balance energético de Pikul.

### 3.3 Métodos de evaluación de recursos geotérmicos

#### 3.3.1 Método Volumétrico

Denominado también método del “calor volumétrico” o del “calor almacenado” o “*heat in place*”, es la metodología más comúnmente utilizada, y basa su principio en calcular la energía contenida en un cierto volumen de roca.

En este método se suele calcular en primer lugar, el recurso accesible de base (*accessible resource base*, ARB), es decir, la energía térmica existente in situ hasta una determinada profundidad (normalmente 7 km), refiriendo todos los cálculos a la temperatura media anual ( $T_a$ ) en superficie según la fórmula siguiente

$$ARB_7 = V \cdot \rho \cdot c \cdot \frac{(T_7 - T_0)}{2} \quad (4)$$

Donde

ARB<sub>7</sub> = recurso accesible de base a 7 km de profundidad, [J]

V = volumen desde la superficie de la tierra hasta la profundidad de 7 km, [m<sup>3</sup>]

$\rho$  = densidad promedio de la columna de roca, [kg·m<sup>-3</sup>]

c = calor específico promedio, [J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]

T<sub>7</sub> = temperatura a 7 km de profundidad, [°C]

T<sub>0</sub> = temperatura media anual superficial, [°C]

En la práctica, esta aproximación se lleva a cabo dividiendo la porción de la corteza superior bajo un área determinada en una serie de intervalos, los cuales normalmente corresponden a las unidades geológicas, y se estima a continuación la temperatura de cada volumen. El calor in situ ( $H_0$ , en Joule) determinado usando el método volumétrico es:

$$H_0 = [(1 - P) \cdot \rho_m \cdot c_m + P \cdot \rho_w \cdot c_w] \cdot [T_t - T_0] \cdot A \cdot \Delta z \quad (5)$$

Donde

$P$  = porosidad efectiva

$T_t$  = temperatura en la parte superior del acuífero, [K]

$\Delta z$  = espesor neto o espesor del acuífero, [m]

$A$  = área de la superficie considerada, [m<sup>2</sup>]

$\rho_m$  = densidad promedio de la columna de roca, [kg·m<sup>-3</sup>]

$c_m$  = calor específico promedio de la columna de roca, [J·Kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>]

$\rho_w$  = densidad del fluido del acuífero, [kg·m<sup>-3</sup>]

$c_w$  = calor específico específica del fluido del acuífero, [J·Kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>]

Este método asume que el fluido presente en los acuíferos es agua y la temperatura de los acuíferos se estima generalmente mediante geotermometrías químicas. Esta aproximación requiere fijar una temperatura al techo del almacén y suponer que se encuentra en equilibrio térmico con la roca [8,47].

Sin embargo, solo una fracción del calor in situ ( $H_0$ ) puede ser recuperado. Esto se tiene en cuenta introduciendo el denominado factor de recuperación ( $R_0$ ), que permite expresar la energía geotérmica extraíble ( $H_1$  en Joule) como una porción de la total contenida en un volumen determinado del subsuelo.

$$H_1 = H_0 \cdot R_0 \quad (6)$$

### 3.3.2 Método evaluación de flujo térmico superficial

Se basa en el cálculo de la energía térmica que por unidad de tiempo se transmite del suelo a la atmósfera y a las aguas superficiales por medio del fluido conductivo ( $P_1$ ) y las descargas

de las manifestaciones termales ( $P_2$ ). El valor obtenido se denomina “potencia térmica natural” ( $P$ ) del área ( $A$ ) considerada [48]. Así tenemos, que

$$P = P_1 + P_2 \quad (7)$$

Siendo el flujo conductivo

$$P_1 = A \cdot q \quad (8)$$

Donde

$A$  = área [ $m^2$ ]

$q$  = flujo de calor conductivo [ $J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$ ]

Y la energía térmica de los fluidos de descarga

$$P_2 = Q \cdot C \cdot (T - T_a) \quad (9)$$

Donde

$Q$  = caudal másico [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]

$C$  = capacidad térmica volumétrica [ $J \cdot K^{-1} \cdot m^{-3}$ ]

$T$  = temperatura del fluido descargado [K]

$T_a$  = temperatura ambiente [K]

A partir de la potencia termal natural ( $P$ ) se puede calcular la energía total ( $H$ ) almacenada en el subsuelo, para un tiempo determinado ( $t$ ).

$$H = P \cdot t = (P_1 + P_2) \cdot t \quad (10)$$

Una vez calculada  $H$ , es posible estimar la fracción recuperable utilizando un factor de recuperación  $R_0$ .

### 3.3.3 Método sHE (specific heat exchanger)

Este método considera, la transferencia de calor por conducción en la roca sólida y el agua subterránea que satura los poros de la roca. En base a esto, para aplicaciones de ingeniería se define el *specific Heat Exchanger* (sHE), medido en W/m, **como un factor que representa la eficiencia térmica de la roca.**

Para instalaciones de calefacción con bomba de calor geotérmica y una capacidad de hasta 30kW, el diseño y dimensionado de la captación puede estimarse a partir de los valores de captación de calor específicos en W/m que se encuentran tabulados en la norma alemana VDI 4640 (véase

Tabla 3-1).

Los valores que indica la norma fueron calculados para captaciones verticales, con longitud de sonda geotérmica entre 40 y 100 m, con una distancia mínima entre dos sondas geotérmicas de al menos 5 m para longitudes de 40 a 50 metros y de al menos 6 m en longitudes de mayores a 50 metros, los intercambiadores geotérmicos que se usan son dobles con forma de U de diámetros de 20/25/32 mm o intercambiadores coaxiales con diámetro mínimo de 60mm.

Tabla 3-1 Valores específicos de extracción de calor para intercambiadores geotérmicos.

Modificado de norma VDI 4640 [26]

Subsuelo	Captación de calor específica			
	para 1800 h [W/m]		para 2400 h [W/m]	
Valores índice generales:				
Subsuelo pobre (sedimento seco) ( $\lambda < 1,5 \text{ W m} \cdot \text{K}$ )	25		20	
Roca normal – subsuelo y sedimento saturado de agua ( $l = 1,5\text{-}3,0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )	60		50	
Roca dura con alta capacidad de transmisión térmica ( $\lambda < 3,0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{L})$ )	84		70	
Rocas fragmentarias	<	25	<	20
Grava, arena (secas)				
Grava, arena con agua	65	80	55	65
Con fuerte corriente de agua del subsuelo en grava y arena, para sistemas aislados	80	100	80	100
Arcilla, barro húmedos	35	50	30	40
Piedra caliza (masiva)	55	70	45	60
Arenisca	65	80	55	65
Magmática silícea (por ejemplo granito)	65	85	55	70
Magmática básica (por ejemplo basalto)	40	65	35	55
Neis	70	85	60	70

Utilizando los valores tabulados de sHE, más la información geológica y estratigráfica, es posible determinar el potencial de recursos geotérmicos de muy baja entalpía en un punto determinado.

Para ello se multiplica el espesor de la columna de roca en ese punto por el factor sHE correspondiente al tipo de roca y se obtiene para cada punto un sHE promedio. En el caso de haber más de un tipo de roca en la vertical del punto, el sHE se calcula de la siguiente manera:

$$sHE_{prom} = \frac{1}{E_{total}} \sum_{k=1}^n (sHE_k \cdot E_k) \quad (11)$$

$$E_{total} = \sum_{k=1}^n E_k \quad (12)$$

Donde:

sHE = sHE (*specific heat exchanger*) promedio, [ $W \cdot m^{-1}$ ]

$E_{total}$  = espesor total, [m]

$sHE_k$  = sHE (*specific heat exchanger*) de la roca k-ésima, [ $W \cdot m^{-1}$ ]

$E_k$  = espesor de la roca k-ésima, [m]

Este método permite realizar una evaluación de los recursos geotérmicos de muy baja entalpía disponibles en un territorio. Adicionalmente es posible junto a la litología incorporar otras variables como la temperatura de la superficie del suelo, vegetación, insolación, o el gradiente geotermal para realizar una aproximación más precisa [12].

### 3.3.4 Método balance energético de Pilkul

Pilkul [49] plantea el uso de información meteorológica para calcular la temperatura superficial del suelo en base a un balance energético del flujo de calor entre la superficie y la atmosfera. Se tiene en consideración el flujo de calor sensible como la transferencia de calor realizada por el aire sobre la superficie, tiene en cuenta también otras variables tales como la altitud, radiación solar, humedad del suelo, velocidad del viento y la altura de la cobertura de vegetación. Según las ecuaciones propuestas por Pilkul la temperatura superficial del suelo ( $T_1$ ) se calcula utilizando la siguiente formula:

$$T_1 = T + \frac{Q_h}{\rho C_p \cdot k \cdot u_*} \cdot \ln\left(\frac{z-d}{z_0} + \psi\right) \quad (13)$$

Donde:

$T_1$  = Temperatura superficial del suelo, [ $^{\circ}C$ ]

$T$  = Temperatura del aire, [ $^{\circ}C$ ]



$Q_h$  = Flujo de calor sensible, [ $W m^{-2}$ ]

$\rho C_p$  = calor específico volumétrico del aire, [ $J m^{-3} K^{-1}$ ]

$k$  = Temperatura del aire, [K]

$u^*$  = Velocidad de fricción del viento, [m/s]

$z$  = Altura, [m]

$z_0$  = Parámetro de rugosidad de la superficie, [m]

$d$  = Altura de desplazamiento del plano cero ( $d=0$  mm para una superficie lisa,  $d=0,22$  para cobertura vegetal) [m]

$\psi_m$  = Factor de corrección adimensional por cizalle del viento

Adicionalmente, las resistencias de la superficie son importantes parámetros de entrada, los cuales se utilizan para calcular el flujo de calor sensible ( $Q_h$ ) a través de la siguiente fórmula

$$Q_h = \frac{Q_n \cdot (r_a - r_s) - Dq \cdot (\rho C_p \cdot \gamma^{-1})}{\left( \frac{r_a}{s} + (1 + \Delta \gamma^{-1}) \cdot \frac{r_a}{a} + \alpha \cdot \left( \frac{r_a}{a} + \frac{r_s}{s} \right) \right)} \quad (14)$$

Donde:

$Q_h$  = Flujo de calor sensible, [ $W m^{-2}$ ]

$Q_n$  = Flujo de radiación neta, [ $W m^{-2}$ ]

$r_a$  = Resistencia aerodinámica, [ $S m^{-1}$ ]

$r_s$  = Resistencia de la superficie, [ $S m^{-1}$ ]

$Dq$  = Déficit de presión de vapor, [mbar]

$\rho C_p$  = Calor específico volumétrico del aire, [ $J m^{-3} K^{-1}$ ]

$\Delta$  = Pendiente de la curva de presión de vapor de saturación, [mbar/ $C^\circ$ ]

$\gamma$  = Constante psicométrica, [mbar/°C]

$\alpha$  = Fracción del calor sensible dividida al flujo de calor del suelo

Esta metodología se ha empleado para determinar mapas de potencial térmico, en el cual se calcula el valor de temperatura de la superficie del suelo para un área o región específica [15].

### 3.4 Evaluación de recursos geotérmicos mediante tecnología GIS

Un GIS es una herramienta que permite recopilar, integrar administrar y analizar datos con información espacial. Los datos se organizan en capas y pueden ser visualizadas generando mapas 2D o representaciones 3D.

Los GIS son una herramienta que permite realizar evaluaciones de recursos geotérmicos aplicando los métodos expuestos en el apartado anterior, como muestran las diversas investigaciones documentadas que han sido llevadas a cabo a nivel internacional.

La revisión y análisis de estas investigaciones ha sido útil para identificar los aspectos metodológicos aplicables al desarrollo de este trabajo, determinar la información necesaria y el alcance de los resultados. A continuación, se realiza una breve descripción de las investigaciones documentadas que se consideraron más relevantes en el contexto de este trabajo.

*A geothermal favorability map of Chile, preliminary result* [50], estudio publicado en el año 2013, realizó un modelo que identificó las áreas con una alta probabilidad para el desarrollo de sistemas geotermales para producción eléctrica. El modelo se desarrolló usando la calculadora ráster del software ArcMap reclasificando los valores de las capas GIS con información geológica, geofísica y geoquímica. El estudio concluye que existe correlación con los centros eruptivos e identifica que un 0,2% del área de estudio podría ser clasificado como altamente favorable, un 3,2% como medianamente favorable y 96% como no favorable.

*Estimating low-enthalpy geothermal energy potential for district heating in Santiago basin* [51], publicado en el año 2015 realizó un estudio en la cuenca de Santiago, donde se estiman a nivel regional los recursos de muy baja entalpía y se identifican zonas prometedoras para su desarrollo. El modelo definió un sistema de captación abierto con 2 pozos, un sistema de captación vertical cerrado con una sonda geotérmica, calculo una demanda energética en base a una vivienda promedio, supuso aislamiento térmico para esa vivienda y utilizó información sobre propiedades geológicas e hidrogeológicas del suelo en formato GIS utilizando el software

ArcMap. El estudio concluyó que para suplir la demanda estimada se deben perforar entre 35 – 105 metros, con un promedio de 58 metros, para sistema de captación vertical cerrados con una sonda geotérmica y entre 100 – 400 metros, con un promedio de 68 metros, para sistemas de captación abierto con 2 pozos. Se identifica la importancia de la profundidad del nivel estático del agua subterránea por la mayor conductividad térmica asociada a los sedimentos saturados y se evidencia que zonas con niveles estáticos someros son más favorables para la instalación de ambos tipos de sistemas.

Otros trabajos desarrollados en Chile que tienen relación con la determinación de potenciales geotérmicos de muy baja entalpía identificados fueron memorias de pregrado [51–53] de la Universidad de Chile. Donde se realizaron estimaciones de potencial para la ciudad de Talca, Región Metropolitana y para la comuna de Colina respectivamente.

En relación con el uso de sistemas de información geográfica (GIS) para determinar potenciales de energía geotérmica de muy baja entalpía a nivel internacional se destacan los siguientes estudios.

**Evaluación del potencial de energía geotérmica, Estudio Técnico PER 2011-2020** [3], memoria realizada por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) en el marco de la elaboración del Plan de Energía Renovables en España. Su objetivo fue realizar un estudio de la evaluación del potencial de la energía geotérmica y la definir las áreas de mayor interés para los recursos de muy baja entalpía. Los modelos a escala regional que presenta se basan en el método (sHE), de la norma alemana VDI 4640. Los valores de captación de calor específicos (sHE) son asignados a cada una de las litologías presentes en el Mapa Litoestratigráfico y de Permeabilidad de España escala a 1:200.000 y define a partir de estos datos un mapa de potencial geotérmico superficial. El estudio concluye que el mapa resulta válido para llevar a cabo una estimación preliminar del número y profundidad de sondeos necesarios en función de la potencia geotérmica total necesaria (vatios), aunque determina que para llevar a cabo un proyecto de detalle es necesario realizar ensayos de repuesta térmica y determinar con mayor seguridad el valor de las propiedades térmicas del suelo.

*GIS-based modelling of shallow geothermal energy potential for CO2 emission mitigation in urban areas* [11]. Este estudio publicado en 2016 presenta una sectorización de la ciudad de Ludwigsburg en base a las demandas térmicas de cada zona y determinó la fracción

de la demanda que puede ser satisfecha por bombas e intercambiadores de calor. El modelo desarrollado determino en primer lugar la demanda térmica, luego determino el potencial de energía geotérmica usando un modelo 3D con información geológica de la ciudad al cual se le asignó un valor de captación de calor específico (sHE) según la norma VDI 4640, posteriormente en función de la demanda, el potencial de energía geotérmica y el espacio disponible para la instalación de las captaciones, determina el porcentaje de demanda térmica que puede ser satisfecha. También calcula el porcentaje de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> como resultado del posible uso de la energía geotérmica de muy baja entalpía. El estudio concluye que resulta más fácil cubrir la demanda energética de las zonas con menor densidad de edificación que las del centro de la ciudad cuya densidad es mayor, esto se debe principalmente a la dificultad para determinar el consumo específico de cada edificio, además de que estos no disponen del espacio suficiente para realizar la perforación de pozos suficientes para satisfacer la demanda.

También se identificaron trabajos desarrollados utilizando sistemas de información geográfica (GIS) para la determinación de potenciales geotérmicos de alta entalpía en México [55], Japón [55,56], Turquía [58] y otros desarrollados en Italia [12] e Irán [59] que si bien determinan potenciales geotérmicos de baja entalpía, estos utilizan parámetros económicos que se encuentran fuera de los alcances y limitaciones definidos en este estudio.

## 4 Desarrollo metodológico

### 4.1 Recopilación y análisis de información

De las metodologías propuestas por los estudios analizados se concluye que para la creación de mapas de potencial geotérmico de muy baja entalpía es necesario disponer como mínimo de información geológica e hidrogeológica en formatos adecuados para su tratamiento mediante herramientas GIS.

La herramienta GIS seleccionada para este trabajo, es la versión ArcGIS 10.6.1, disponible en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Concepción. Esta aplicación cuenta con las características necesarias para realizar los análisis requeridos y manejar la información geológica e hidrogeológica, disponible.

La información recopilada corresponde a:

**Mapa geológico de Chile 1:1.000.000** [60] resultado del proyecto multidisciplinario desarrollado por el Servicio Nacional de Minería y Geología (SERNAGEOMIN) y que fue publicado en el año 2002, corresponde a una compilación de mapeos geológicos y trabajos de geólogos del servicio e investigadores con los cuales se logró realizar una representación conceptual de las principales unidades geológicas relevantes a escala regional, esta se encuentran disponible en una versión digital en la tienda E-MAPS [61] del SERNAGEOMIN, la cual incluye diferentes coberturas con información.

**Actualización del balance hídrico nacional** [62], informe desarrollado por el Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Universidad de Chile y la Pontificia Universidad Católica, y publicado en el año 2017.

Las coberturas GIS con información contenidas en ambos estudios se encuentran en forma de entidades geométricas, tipo punto, línea, anotaciones o polígonos cada uno asociado a un conjunto de columnas de atributos con información asociada a la entidad geométrica.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó la información contenida en las coberturas con proyección cartográfica UTM, Datum WGS84 descritas en la Tabla 8-3 (véase ANEXOS A: Tablas), donde se indica el nombre de la cobertura, descripción, fuente de procedencia y sitio de descarga.

## 4.2 Definición del método de evaluación de potencial geotérmico

Con la información contenida en las coberturas GIS recopiladas y en función de las diferentes metodologías se realiza un análisis comparativo para determinar las más idóneas.

El análisis consta en determinar si los parámetros de entrada que requiere cada metodología se encuentran disponibles en las coberturas cartográficas recopiladas y en caso de no estar presentes determinar si es posible incorporar la variable mediante información bibliográfica (véase ANEXOS A: Tablas, Tabla 8-4).

Resultado del análisis se obtiene que el Método del flujo térmico superficial no es posible aplicarlo, debido a que parámetros como el caudal másico ( $Q$ ) y la temperatura del fluido de descarga ( $T$ ) no se encuentran disponibles en las coberturas GIS, además de no poseer información bibliográfica que permita realizar una evaluación de estos parámetros a escala nacional. El Método de balance energético de Pikul tampoco resulta viable pues parámetros tales como la rugosidad del suelo ( $z_0$ ), altura ( $z$ ) y la velocidad de fricción del viento ( $u^*$ ) no se encuentran disponibles.

El método más adecuado a las características de este trabajo y los datos disponibles es el Método sHE (*specific Heat Exchanger*), la evaluación mediante este método es factible ya que el parámetro de entrada principal (tipo de roca) se encuentra disponible en las coberturas GIS, proporcionadas por el SERNAGEOMIN. Y se puede realizar la asignación del valor sHE a partir de la norma VDI 4640 para cada una de las litologías, emulando así el trabajo realizado en España [3].

Por otro lado, el Método Volumétrico también se determina como factible, si bien solo dispone de los polígonos con información geológica contenidos en las coberturas GIS del SERNAGEOMIN, es posible asignar propiedades térmicas a las litologías a partir de valores obtenidos de bibliografía asumiendo ciertos supuestos de simplificación.

Por lo tanto, la evaluación del potencial de energía geotérmica de muy baja entalpía se desarrollará utilizando ambos métodos el Método Volumétrico y el Método sHE (*specific Heat Exchanger*).

### **4.3 Creación de los mapas de potencial geotérmico de muy baja entalpía**

#### **4.3.1 Método volumétrico**

La creación del mapa de potencial de energía geotérmica de muy baja entalpía a través del Método Volumétrico consta de 3 etapas: Selección de datos de entrada, Asignación de parámetros y Procesamiento de la información.

##### **1- Selección de datos de entrada**

Consiste en determinar los datos útiles en las coberturas GIS para la elaboración del modelo.

Para el desarrollo del Método Volumétrico se seleccionan 2 coberturas GIS contenidas en el Mapa geológico de Chile 1:1.000.000, estas presentan la información en forma de entidad tipo polígono en formato vectorial asociado a una tabla de atributos cuyo nombre corresponde a “Polígono Geología” y “Polígono Dominios Morfoestructurales” respectivamente.

El “Polígono Geología” consta de un total de 15.638 polígonos individuales, cada uno de ellos asociados a una tabla que contiene como atributos: área, perímetro, geología, unidad, rango, edad, geomorfología, propiedad roca, roca, ambiente y leyenda, siendo el atributo roca el más relevante y de interés para este trabajo.

En particular cada polígono contiene información de a lo más 4 diferentes tipos de rocas denominadas ROCA1, ROCA2, ROCA3 y ROCA4 de las cuales debido a la escala del mapa se desconoce su distribución o proporción al interior de cada polígono.

A consecuencia de este problema en la escala de la información se realiza la simplificación de considerar solo los tipos de roca con los atributos ROCA1 y ROCA2, que se encuentran en el 96,2% y 91,3% respectivamente de los polígonos presentes en la cobertura GIS, y son los tipos de rocas principales en Chile.

La cobertura “Polígono Dominios Morfoestructurales” consta de una total de 4 polígonos en los que se identifican las principales estructuras morfoestructurales del país las cuales son Cordillera de la Costa, Depresión Central, Cordillera de los Andes y la Patagonia extra andina.

##### **2- Asignación de parámetros**

Se realiza de forma independiente para cada una de las coberturas.

Al “Polígono Geología” se asignan 2 parámetros en las tablas de atributos, el “calor específico volumétrico” y la “conductividad térmica” en función del atributo ROCA1 y ROCA2 (véase ANEXOS A: Tablas, Tabla 8-7 y Tabla 8-8) según el siguiente procedimiento: en primera instancia se verifica si el tipo de roca se encuentra tabulado en la norma alemana VDI 4640 (véase ANEXOS C: Parámetros, Figura 10.1) asignando el valor recomendado en esta, de no encontrarse tabulado en la norma VDI 4640 se recurre a la bibliografía [62–64].

Si el tipo de roca concreto no es encontrado en la bibliografía se asigna un valor en función de su clasificación general como roca magmática, metamórfica o sedimentaria en estos casos se asigna el menor valor de conductividad térmica y calor específico volumétrico para este tipo de rocas a fin de evitar sobreestimaciones en el cálculo final (véase ANEXOS C: Parámetros, Figura 10.2).

Por otro lado, al “Polígono Dominios Morfoestructurales” se le asigna un valor de flujo de calor geotérmico en función de los valores representativos recuperados del estudio *Heat Flow Map of South America* [66], estos valores corresponden a 78 mW/m<sup>2</sup> para la Cordillera de los Andes, 70 mW/m<sup>2</sup> para la Depresión Central y 27 mW/m<sup>2</sup> para la Cordillera de la Costa.

Dado que la Patagonia extra-andina no posee un valor definido, se supone que a nivel morfoestructural es una continuación de la Cordillera de los Andes y se le asigna un valor de flujo de calor igual a 78 mW/m<sup>2</sup>.

El procedimiento de asignación de parámetros descrito para el “Polígono Geología” y “Polígono Dominios Morfoestructurales” se muestra de forma esquemática en la Figura 4.1.



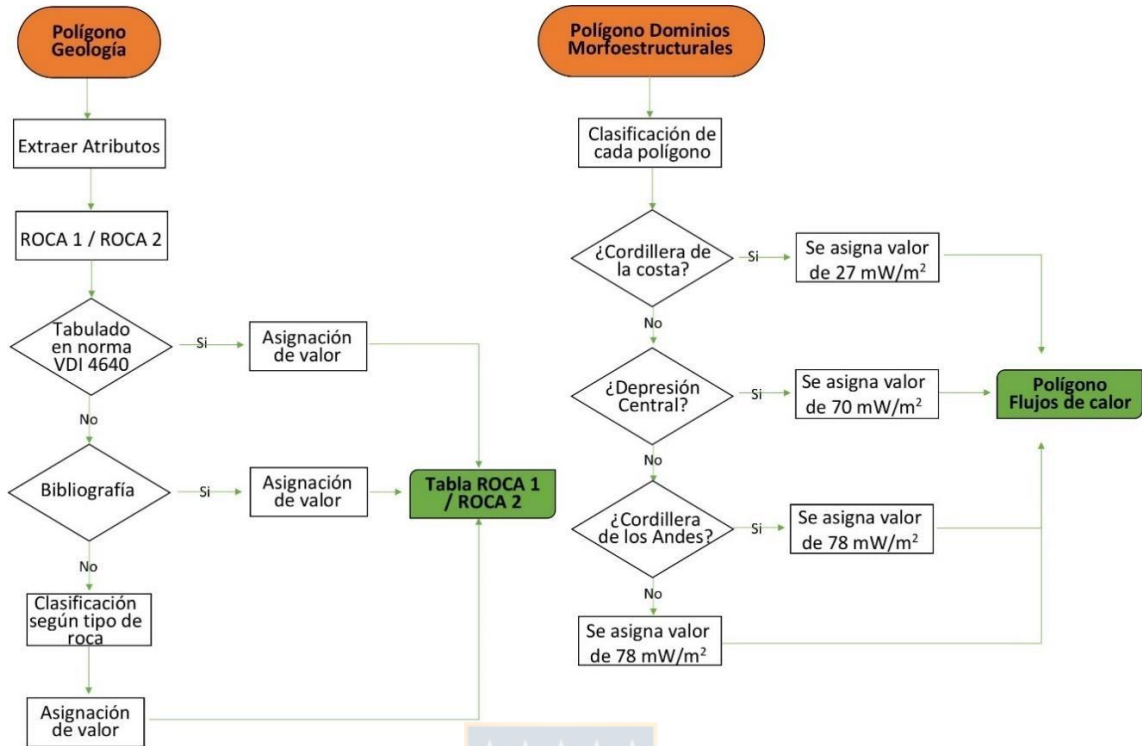


Figura 4.1 Asignación de parámetros a “Polígono Geología” (Izquierda), Asignación de parámetros a “Polígono Dominios Morfoestructurales” (Derecha)

### 3- Procesamiento de la información

En primer lugar, se comprueba que los diferentes polígonos son correctos geoméricamente mediante la herramienta de geoprocresamiento *Repair Geometry*<sup>2</sup> (ruta de acceso a la herramienta: *ArcToolbox > Data Management Tools > Features*).

El siguiente paso es convertir los polígonos vectoriales y el valor de los parámetros asignados a capas con formato de datos ráster para su posterior tratamiento.

Las capas de datos ráster son una matriz de celdas o píxeles organizadas en filas y columnas en la que cada celda tendrá asignado un valor que representa información de los parámetros definidos.

<sup>2</sup> Herramienta de administración de datos que inspecciona cada entidad de una misma clase para verificar si existen problemas de geometría tales como: intersección de un polígono consigo mismo, superposición de polígonos, dos o más vértices con coordenadas idénticas, partes nulas o vacías, discontinuidad o desconexiones de los segmentos.

La conversión de las entidades tipo polígono vectorial a ráster se realiza mediante la herramienta ***Polygon to Raster*** (ruta de acceso a la herramienta: *ArcToolbox > Conversion Tools > To Raster*), con ella se transforma un polígono a una capa de datos ráster.

A partir del “Polígono Geología” se crean, utilizando las herramientas descritas, capas ráster con tamaño de celda 100x100 metros para los parámetros “calor específico volumétrico” y “conductividad térmica”, mientras que a partir del “Polígono Dominios Morfoestructurales” se crea la capa ráster con tamaño de celda 100x100 metros para el parámetro “flujo de calor”.

El tamaño de celda de 100x100 metros fue determinado de forma iterativa en función de lograr el mayor ajuste a la geometría original sin aumentar considerablemente el tiempo de procesamiento.

Las capas ráster generadas se operan entre si mediante la herramienta ***Raster Calculator*** (ruta de la herramienta: *ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Map Algebra*) siguiendo la ecuación (4) y planteando las siguientes hipótesis:

- Las rocas están saturadas de agua, el calor específico ( $C_w$ ) y densidad ( $\rho_w$ ) del agua son 4.186 J/g°C y 1000 kg/m<sup>3</sup> respectivamente.
- Se considera una profundidad de 100 metros.
- Se asume una porosidad efectiva (P) igual al 10%
- El gradiente geotérmico o gradiente de temperatura ( $\Delta T$ ) se calcula a partir del flujo de calor conocido y la ley de Fourier en base a la ecuación (3).

Como resultado de operar las capas ráster se obtiene otra capa ráster que contiene el valor de calor in situ ( $H_0$ ), a la cual se le aplica un factor de recuperación ( $R_0$ ) igual a 0,1 que corresponde a un valor típico para captaciones verticales con una sonda geotérmica [8]. Finalmente se genera un ráster con el valor de la energía geotérmica extraíble ( $H_1$ ).

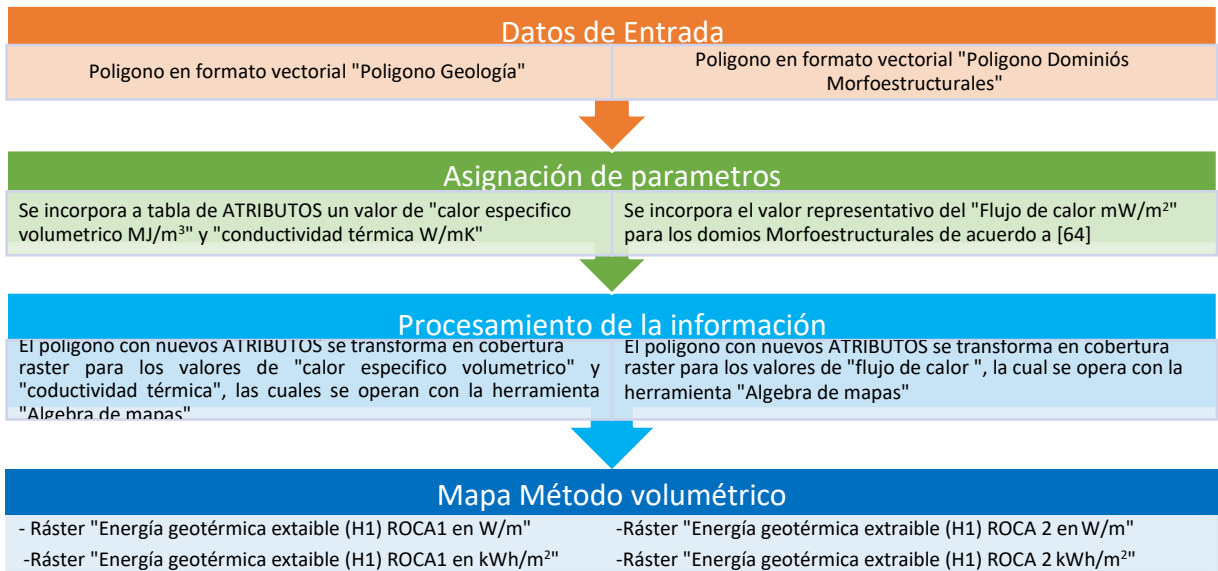
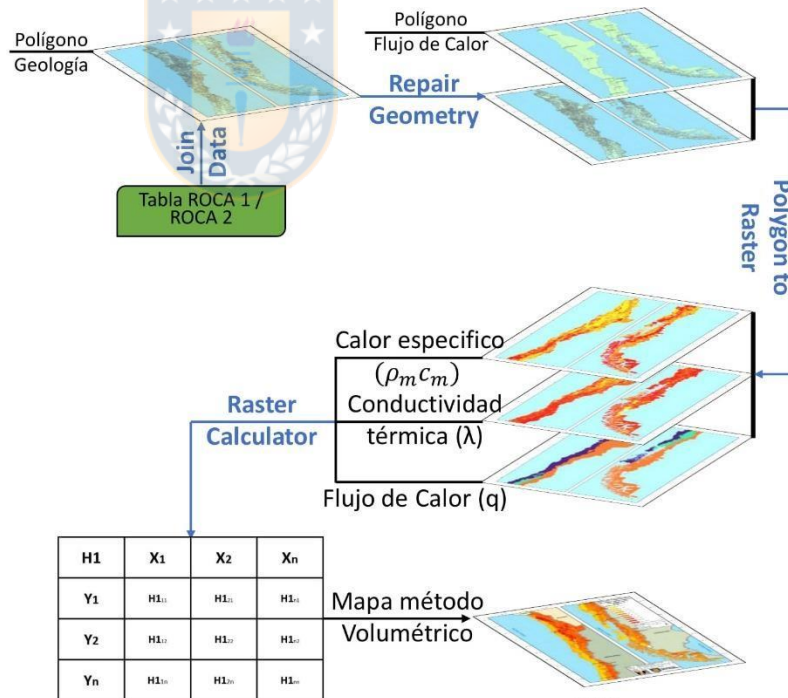


Figura 4.2 Esquema general creación mapa mediante el Método volumétrico

El procesamiento de la información se muestra de manera detallada en ANEXOS B: Esquemas



y de forma general en la Figura 4.3.

$$H1_{nn} = [(1 - P) \cdot (\rho_m c_m)_{nn} + P \cdot \rho_w \cdot c_w] \cdot \left[ \frac{q_{nn} \cdot 100}{\lambda_{nn} \cdot 1000} \right] \cdot 0,1 \cdot \Delta z$$

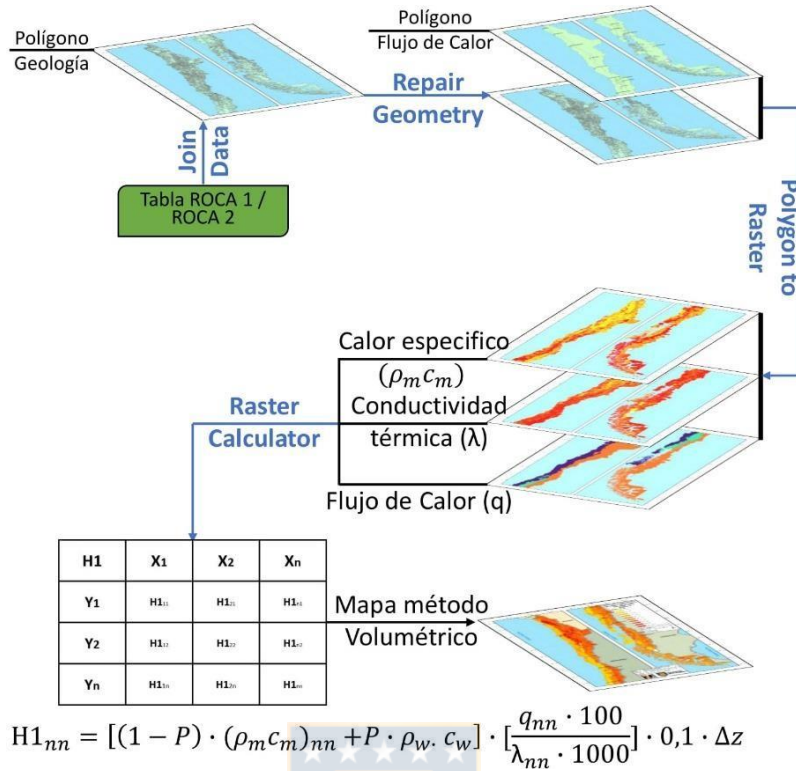


Figura 4.3 Procesamiento de la información Método Volumétrico

### 4.3.2 Método sHE (specific heat exchanger)

El mapa de potencial de energía geotérmica de muy baja entalpía elaborado a través del Método sHE consta como en el caso anterior de tres etapas: Selección de datos de entrada, Asignación de parámetros y Procesamientos de la información.

#### 1- Selección de datos de entrada

En primer lugar, se definen los datos útiles para el desarrollo del método. En este caso la variable de entrada corresponde al tipo de roca, dicha información se encuentra contenida en la cobertura GIS del Mapa geológico de Chile 1:1.000.000 específicamente en la tabla de atributos asociada al “Polígono Geología” descrito anteriormente.

En base al mismo criterio aplicado en el Método volumétrico se define que los datos de entrada del modelo serán los tipos de ROCA1 y ROCA2.

Posteriormente, se procede aplicando el método utilizado en España [3] y considerando los valores de la norma VDI (véase Tabla 3-1) se realiza una clasificación general en la cual se

definen 6 grupos de litologías y se asigna un valor de captación de calor específico sHE a cada uno (véase Tabla 4-1).

Tabla 4-1 Clasificación de valores de captación de calor específicos.

Grupo	Litología	Nivel de agua	captación de calor específico [W/m]	
			para 1800 h	para 2400 h
A	Arenas, gravas, limos	Muy secos	20	15
B	Arenas, gravas, limos	Humedo, saturado	80	70
C	Arcillas, brechas, magras		40	35
D	Caliza, areniscas, conglomerados		60	50
E	Roca Volcanica		50	40
F	Roca Metamorfica		70	65

## 2- Asignación de parámetros

Se realiza de forma independiente para cada tipo de roca. Primero se verifica si el tipo de roca se menciona explícitamente en la Tabla 4-1, de no encontrarse de manera explícita se clasifica en un grupo en función de su clasificación general en roca magmática, metamórfica o sedimentaria. Finalmente, si no es posible clasificar la litología o esta no se encuentra como atributo en un polígono asignar un valor de captación de calor específico igual a 0 W/m.

El procedimiento de asignación de valores de captación de calor específicos descrito para el “Polígono Geología” en base al Método sHE se muestra en la Figura 4.4.

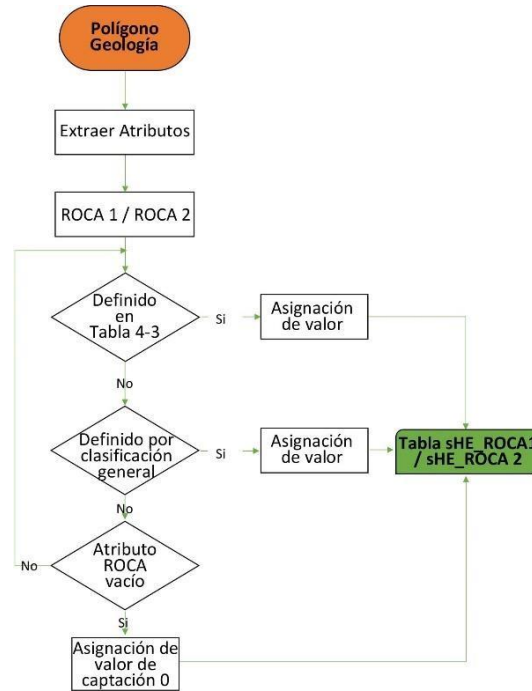


Figura 4.4 Asignación valor de captación de calor específico a “Polígono Geología”

### 3- Procesamiento de la información

El procedimiento es similar al realizado en el Método Volumétrico y consiste en comprobar primero los diferentes polígonos mediante la herramienta de geoprocésamiento *Repair Geometry*. Después se transforman los polígonos vectoriales en capas ráster con el valor asignado de captación de calor específico (sHE). En este paso se crean dos capas con escenarios distintos una capa para una condición “No saturado” y otra que asume la condición “Saturado” en ambos casos suponiendo dos escenarios, un funcionamiento de 1.800 y otro de 2.400 horas por año.

La condición “No saturado” de los valores de captación de calor específicos representados en las coberturas ráster obtenidas plantea el supuesto de la ausencia de agua en los primeros 100 metros de profundidad desde el nivel del suelo, que corresponden a la longitud máxima de los intercambiadores.

La condición “Saturado” de los valores de captación de calor específicos plantea el supuesto de la presencia de agua al grado de saturación de las litologías, desde el nivel del suelo hasta la longitud máxima de los intercambiadores. Por otro lado, los dos escenarios de funcionamiento “1800 horas por año” y “2400 horas por año” se refieren al tiempo de operación

de la bomba de calor acoplada al sistema de captación vertical cerrado, donde el valor de captación de calor específico para una misma litología es menor si se supone un mayor uso del sistema, ya que este parámetro se calcula en función de asegurar la sostenibilidad del recurso.

El tamaño de celda seleccionado para las capas ráster utilizadas es de 100x100 metros, que es el mismo utilizado para el Método Volumétrico.

Definir un mismo tamaño de celda para los dos métodos de estimación de potencial geotérmico facilita posibilidad de comparar y operar las capas de datos obtenidas en ambos modelos.

El resultado final de aplicar el Método sHE son cuatro capas ráster, que representan mapas de potenciales geotérmicos en condición “No saturado” y “Saturado” para un sistema de captación vertical que opera 1800 y otro a 2400 horas por año asociado a una bomba de calor geotérmica de una capacidad máxima de 30 kW funcionando en régimen de calefacción.

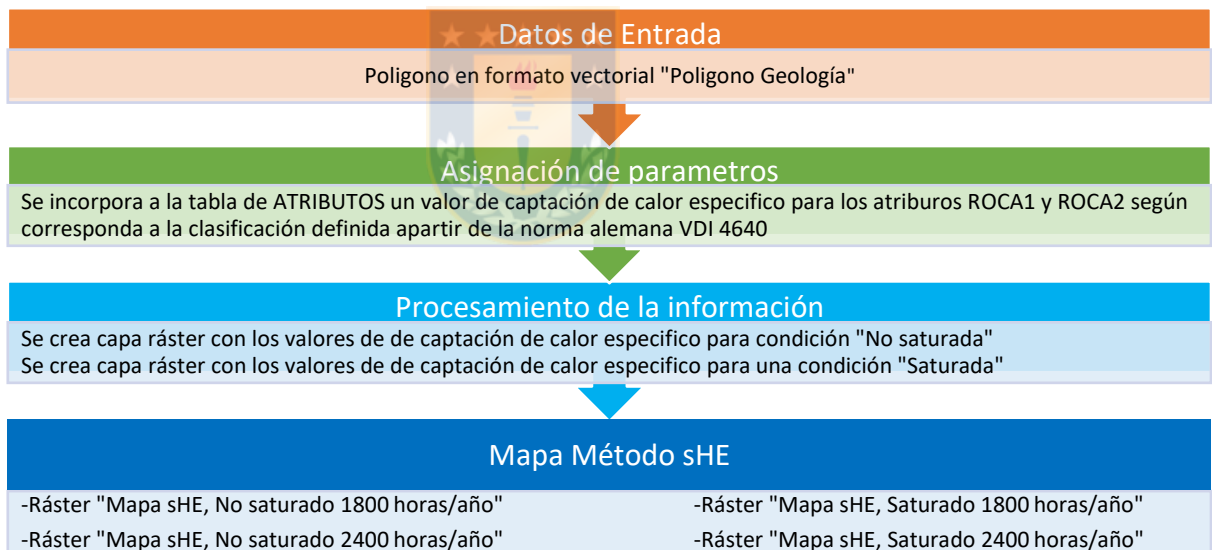


Figura 4.5 Esquema general creación mapa mediante el Método sHE

El procesamiento de la información para el desarrollo del Método sHE se muestra de manera esquemática en la Figura 4.6 y los procesos detallados se encuentran en ANEXOS B: Esquemas.



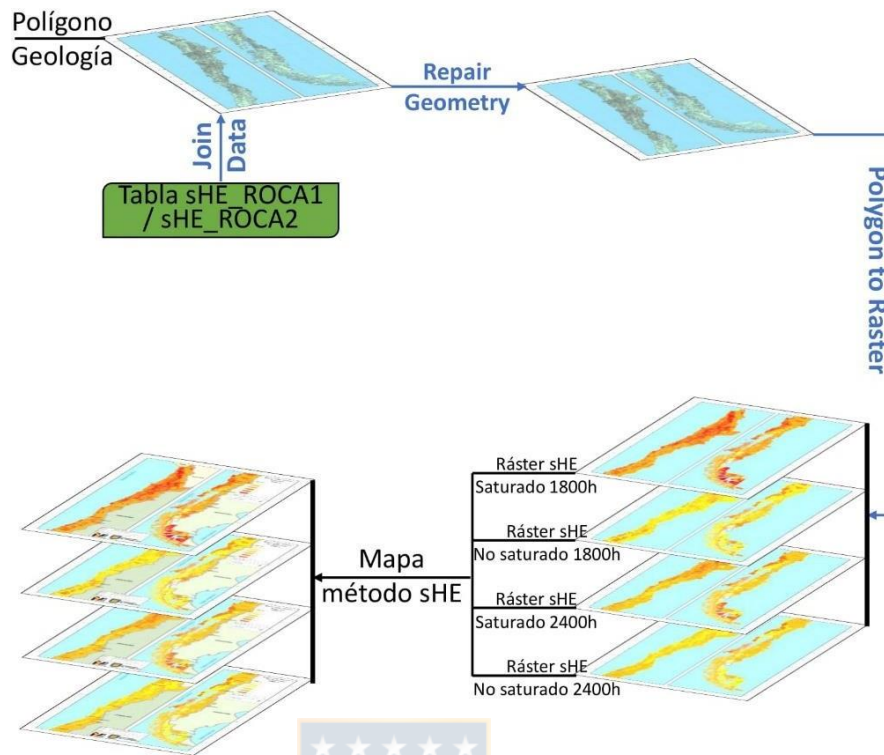


Figura 4.6 Procesamiento de la información Método sHE

La presencia de agua aumenta el valor de captación de calor específico de las arcillas, gravas y limos [26] razón por la cual se consideran de diferente grupo dependiendo de esta condición.

Teniendo esto en cuenta los mapas de potencial geotérmico de muy baja entalpía obtenidos para los valores de captación de calor específico “No Saturado” y “Saturado” corresponderían al escenario más desfavorable y favorable respectivamente.

Para una aproximación más real sería necesario introducir al modelo información sobre el nivel estático del agua subterránea y determinar a través de la ecuación (11) un valor de captación de calor específico promedio que considere tanto la potencia de la columna de roca saturada como la potencia de la columna de roca seca.

La ausencia de una red de monitoreo de los niveles del agua subterránea en Chile [62] es un obstáculo que no permite desarrollar un modelo que represente esta situación.



En Chile hay un total 691 estaciones de nivel de pozo distribuidas de forma heterogénea, concentradas principalmente en la macrozona norte y centro, pero solo se dispone de un total de 277 datos con el valor de nivel estático medio (en adelante NE).

Pese a que la información contenida en la base de datos [62] es considerada insuficiente para realizar un modelo confiable, se plantea una metodología y se utilizan los 277 datos de pozo disponibles más los puntos hidrográficos de embalses y lagos a los cuales se le asigna un valor supuesto de nivel estático y profundidad de pozo correspondiente a 0 metros. En función de estos datos y mediante la herramienta de interpolación de datos de ArcGIS *Inverse distance weighted (IDW)* (ruta de acceso a la herramienta: *ArcToolbox > Spatial analyst Tools > Interpolation*) se crean 2 modelos de nivel estático (freático) para todo el país. Se utiliza el interpolador IDW por sobre otras opciones, por su sencillez y menor complejidad de cálculo que implica un menor tiempo de procesamiento. Además, los modelos creados si bien carecen de la confiabilidad y poseen una alta incertidumbre, permiten plantear una metodología y estudiar como varía el valor de captación específico (sHE) ante nuevos escenarios diferentes a la condición “No saturado” y “Saturado” obtenidos inicialmente.

En función de los datos hídricos se definen, el escenario A y el escenario B.

El escenario A considera el nivel de nivel freático a partir de los 277 datos de pozos más los puntos hidrográficos de embalses y lagos, este escenario a su vez considera dos modelos. El primero suponiendo un funcionamiento de 1800 horas al año (definido como NFNE\_A 1800h) y un segundo considerando 2400 horas al año (definido como NFPP\_A 2400h).

El escenario B considera el nivel de agua subterránea, pero solo contempla los 277 datos de pozos, obteniendo así un primer modelo en base al valor de nivel estático y un funcionamiento de 1800 horas al año (definido como NFNE\_B 1800h) y un segundo modelo a para 2400 horas al año (definido como NFNE\_B 2400h).

Haciendo uso de la herramienta *Raster Calculator* (ruta de la herramienta: *ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Map Algebra*) es posible operar los nivel de agua subterránea “NFNE\_A” y “NFNE\_B” junto con las capas ráster sHE “No saturado” y “Saturado” siguiendo la ecuación (11) considerando un espesor total ( $E_{total}$ ) de 100 metros y el espesor de la capa  $k$ -ésima ( $E_k$ ) como el valor disponible en el modelo de nivel freático según el escenario considerado.

El procesamiento de la información al elaborar los mapas de potencial geotérmico en base a los diferentes escenarios de nivel freático propuestos se muestra de forma general en la Figura 4.7 y de forma detallada en ANEXOS B: Esquemas, Figura 9.3.

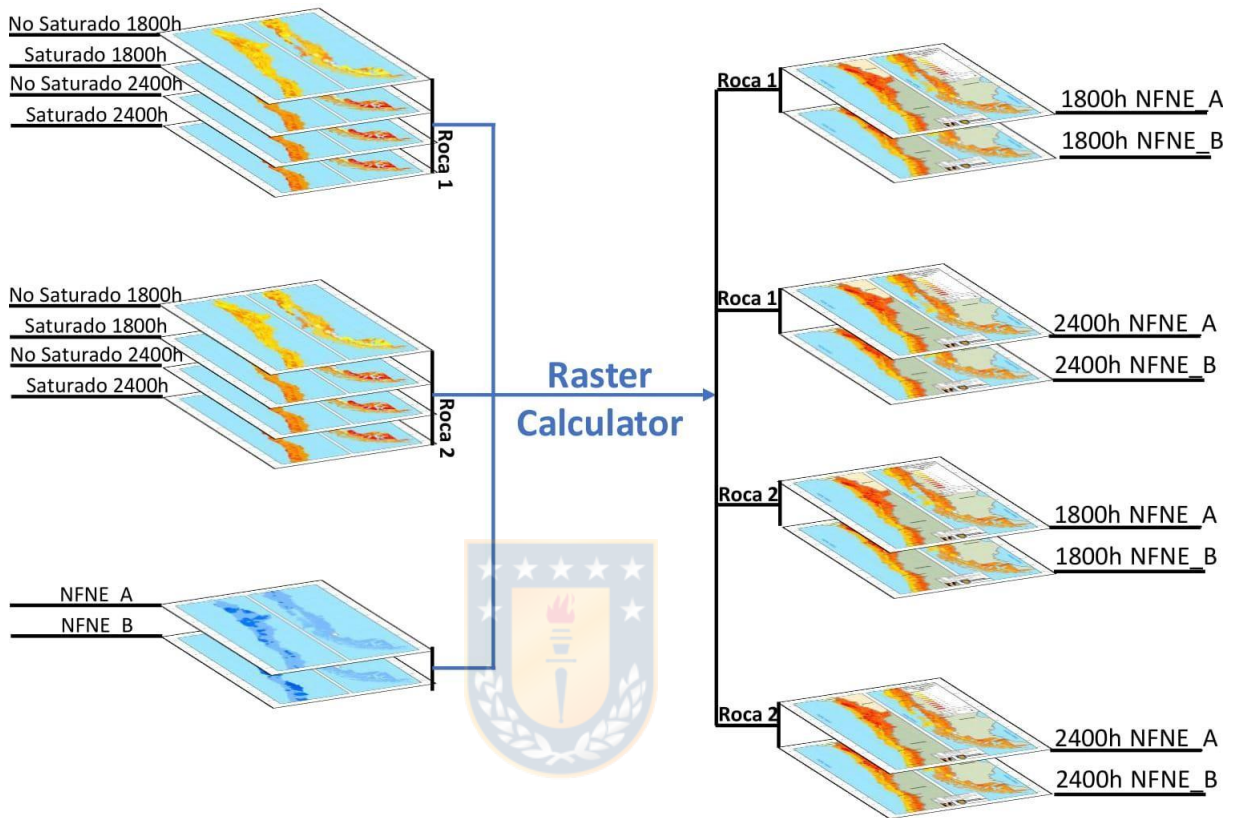


Figura 4.7 Procesamiento de la información Método sHE considerando diferentes escenarios de nivel freático

## **5 Análisis y discusión de resultados**

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

### **5.1 Método Volumétrico**

#### **5.1.1 Representación gráfica**

Los mapas generados a partir de las coberturas ráster que contienen el valor de potencial de energía geotérmica extraíble ( $H_1$ ), medido en  $GJ/m^2$ , se muestran a continuación para la variable ROCA1 y ROCA 2 en la Figura 5.1. Además, dado que el dimensionamiento de las bombas de calor requiere en forma práctica conocer los valores de potencial geotérmico en kWh se realiza la conversión necesaria obteniendo para la variable ROCA1 y ROCA2 nuevos modelos.

Los mapas en formato GIS generados poseen la escala original del mapa geológico 1:1.000.000 con proyección cartográfica UTM huso 19S, DATUM WGS84. Aunque, para el formato del presente documento los mapas se han representado a una menor escala 1:8.000.000 y se adjuntan en el ANEXO D: MAPAS, Figura 11.2-11.5.

En estos mapas los valores de potencial de energía geotérmica extraíble ( $H_1$ ), se representan gráficamente mediante una gama de color que va desde un color amarillo para los potenciales geotérmicos más bajos al color rojo que representa a los potenciales geotérmicos más altos.

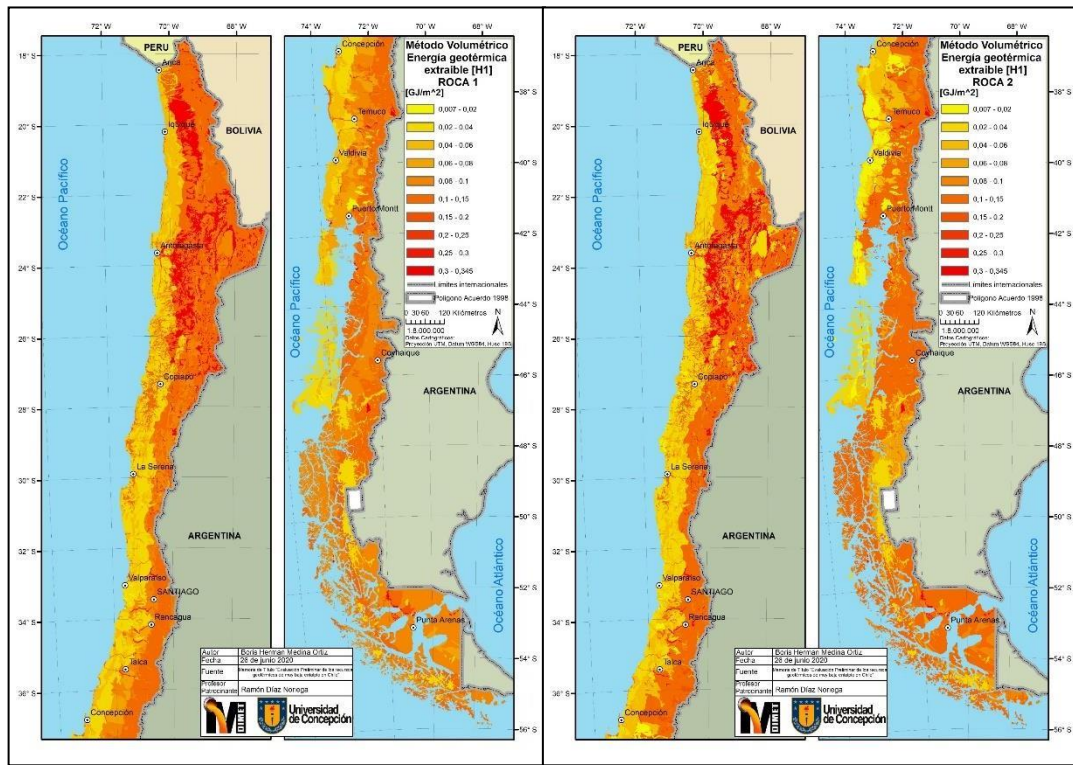


Figura 5.1 Mapa Método volumétrico, energía geotérmica extraíble  $[H_1]$  ROCA 1 (izquierda), ROCA 2 (derecha)

### 5.1.2 Estadísticas generales

Del análisis de los mapas generados se obtienen sus estadísticas principales, que se detallan en la Tabla 5-1. A partir de estos datos se determina que el valor de potencial de energía geotérmica extraíble ( $H_1$ ) estimado para una profundidad de 100 metros se encuentra en un rango que va desde un valor mínimo que se aproxima a los  $0,007 \text{ [GJ/m}^2\text{]}$  a un máximo que se aproxima a los  $0,345 \text{ [GJ/m}^2\text{]}$  independiente de la variable tipo roca considerada. Además, se obtiene un valor promedio para  $[H_1]$  correspondiente a  $0,106 \text{ [GJ/m}^2\text{]}$  para la variable ROCA1 y de  $0,102 \text{ [GJ/m}^2\text{]}$  para la variable ROCA2.

Tabla 5-1 Estadísticas principales de los mapas generados con el Método Volumétrico

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación Estándar	N° columnas	N° filas
H1_roca1_GJ	0,007	0,345	0,102	0,065	7139	42892
H1_roca2_GJ	0,007	0,345	0,106	0,076	7139	42892
H1_roca1_kWh	2,030	95,799	28,264	17,964	7139	42892
H1_roca2_kWh	2,030	95,799	29,333	21,213	7139	42892

Si se consideran estos resultados y la superficie del territorio continental de Chile 754.898 km<sup>2</sup>, se estima que el potencial de energía geotérmica extraíble promedio [H<sub>1</sub>] para los primeros 100 metros de profundidad expresado en exajulios (1 EJ=10<sup>9</sup> GJ) es de 76,81 EJ en base a la variable ROCA1 y de 79,71·10 EJ respecto a la variable ROCA2.

### 5.1.3 Comparación de resultados

Para determinar la validez del modelo se realizó una comparativa con otros estudios internacionales [8] a fin de determinar si los valores obtenidos se encuentran en el rangos esperado 0-0,4 GJ/m<sup>2</sup>. Dado que el rango de valores del modelo fluctúa entre 0,007 a 0,345 [GJ/m<sup>2</sup>] se establece que los valores del modelo están dentro de los rangos aceptables.

Adicionalmente se plantea como medida para garantizar que la evaluación propuesta es aceptable la comparación con los resultados de otras investigaciones a escala local llevadas a cabo en Chile.

La Tabla 5-2 muestra las estadísticas de la investigación realizada en la comuna de Colina [54] y las obtenidas con los modelos desarrollados en este trabajo para la misma zona.

Tabla 5-2 : Comparación de resultados Método Volumétrico área de estudio comuna de Colina.

	Min [GJ]	Max [GJ]	Media [GJ]	Desviación Estándar [GJ]
Estudio [54]	12,3	31,64	17,69	3,69
H1_roca1_kwh	24,75	41,48	34,01	7,37
H1_roca2_kwh	23,82	95,80	34,03	10,99

Al comparar los resultados de la investigación en Colina [54] con los propuestos en el presente estudio, se constata una aparente sobrestimación del potencial geotérmico, siendo el modelo basado en la ROCA1 el que posee un mayor ajuste en rango y media. Se identifica una diferencia del 92,1% en el valor medio del modelo para el área de Colina. Asumiendo que los valores de la investigación en el área de Colina fueron obtenidos con información detallada de la zona y las estimaciones son correctas esta diferencia muestra la importancia que tiene la disponibilidad de información geológica e hidrogeológica detallada para la evaluación de

potenciales geotérmicos y por lo tanto los resultados plateados deben interpretarse con precaución.

#### **5.1.4 Distribución espacial e interpretación del potencial geotérmico**

Los mapas obtenidos muestran una correlación directa entre los valores de energía geotérmica extraíble y los valores de flujo geotérmico, los menores valores del potencial de energía geotérmica extraíble se obtienen en el dominio morfoestructural de la Cordillera de la Costa, que presenta los valores más bajos de flujo geotérmico. Los valores máximos de potencial de energía geotérmica extraíble se obtienen en el dominio morfoestructural de la Cordillera los Andes, que tiene los valores más altos de flujo geotérmico.

Los modelos muestran que en ciudades como Santiago, Rancagua, Talca, Temuco, Puerto Montt, Coyhaique y Punta Arenas se estiman valores de potencial de al menos  $20 \text{ kWh/m}^2$ . Esto supondría una factibilidad de aprovechamiento directo a través de bombas de calor geotérmicas con sistema de captación vertical. Si bien los modelos permiten estimar la disponibilidad de energía geotérmica en estas zonas, para el uso en calefacción. En ciudades como Arica, Iquique, Antofagasta, Copiapó, Valparaíso, Concepción y Valdivia que se encuentren en zonas que presentan valores de potenciales inferiores a  $20 \text{ kWh/m}^2$ , no necesariamente implica que las tecnologías de aprovechamiento directo a través de bombas de calor no sean factibles, sino que más bien plantea la necesidad de evaluar en primera instancia si el sistema implica calefacción o refrigeración y en segundo lugar la evaluación de sistemas de captación horizontales o verticales en sistema abierto en función de la disponibilidad de recurso hídrico en vez de un sistema de captación vertical cerrado.

#### **5.1.5 Oportunidades de mejora**

Los factores principales que inciden en las evaluaciones del Método Volumétrico corresponden a:

- Porosidad efectiva.

A falta de datos más detallados se asume un valor homogéneo del 10% en todas las litologías. Para mejorar el modelo planteado se requiere disponer de una mayor cantidad de información hidrogeológica y esto implica realización de estudios que permitan



determinar las propiedades hidrogeológicas de las geologías del Mapa geológico de Chile escala 1:1.000.000.

- Calor específico volumétrico y conductividad térmica.

Ambos parámetros fueron obtenidos a partir de bibliografía [62–64] y de los valores tabulados en la norma alemana VDI 4640. Si bien estos últimos son los más utilizados en los trabajos de evaluación de potenciales geotérmicos de muy baja entalpía se plantea la necesidad de generar bases de datos con caracterizaciones de las rocas y realizar estudios enfocados en determinar específicamente estos parámetros y sus variaciones para la geología nacional a escala 1:1.000.000.

- Temperatura acuíferos.

El modelo asume este valor a partir de la ley de Fourier, los datos bibliográficos del flujo geotérmico y la conductividad térmica. Al respecto, una mejora importante sería disponer de mediciones de temperaturas efectuadas en terreno o de los flujos de calor geotérmico a una escala mayor a los dominios morfoestructurales.

## 5.2 Método sHE

### 5.2.1 Representación gráfica

Los mapas generados a partir de las coberturas ráster que contienen el potencial de energía geotérmica, medido en [W/m], se muestran suponiendo un funcionamiento de 1800 y 2400 horas al año para la condición “No saturado”, “Saturado” y los escenarios A y B propuestos en función del nivel de agua subterránea para las variables ROCA 1 y ROCA 2.

Los mapas generados poseen la escala original 1:1.000.000 con proyección cartográfica UTM huso 19S, DATUM WGS84. Aunque, para el formato del presente documento los mapas se han representado a una menor escala 1:8.000.000 y se encuentran disponibles en ANEXO D: MAPAS, Figura 11.8-11.23.

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

## 5.2.2 Estadísticas generales

Del análisis de los mapas se obtienen sus estadísticas principales, las cuales se detallan en la Tabla 5-3. De estos resultados se obtiene que los valores promedio de captación de calor específico en función de la variable ROCA1 son entre un 5 – 6% superiores a los valores medios determinados para la variable ROCA2. Además, se constata que existe un aumento en los valores de captación de calor específicos para la condición “saturado” de entre un 19 - 21% si se les compara con la condición “No saturado” independiente del tipo de roca y el tiempo de funcionamiento del sistema.

Tabla 5-3 Estadísticas generales método sHE para condiciones base en función del tiempo de uso y tipo de roca

	Min [W/m]	Max [W/m]	Media [W/m]	Desviación Estándar [W/m]
<b>sHE_R1_NS_18h</b>	0	80	45,61	15,81
<b>sHE_R1_S_18h</b>	0	80	54,29	15,83
<b>sHE_R1_NS_24h</b>	0	70	37,35	13,79
<b>sHE_R1_S_24h</b>	0	70	45,31	14,45
<b>sHE_R2_NS_18h</b>	0	80	43,33	18,31
<b>sHE_R2_S_18h</b>	0	80	51,19	19,45
<b>sHE_R2_NS_24h</b>	0	70	35,58	15,91
<b>sHE_R2_S_24h</b>	0	70	42,78	17,34

El resumen estadístico de los escenarios A y B planteados en función de la posición del nivel freático planteados (véase Tabla 5-4). A partir de estos resultados se logra determinar que existe un aumento mínimo de 14% en el valor medio de captación de calor en relación con el modelo “No saturado” y un aumento máximo de 19% en el escenario más favorable, valor que sigue siendo inferior al valor determinado para la condición “saturada”, lo que demuestra la incidencia que tiene sobre el valor de potencial geotérmico los valores de nivel freático, los cuales idealmente deben ser obtenidos a partir de estudios hidrogeológicos.

Tabla 5-4 Resumen estadísticos escenarios A y B de nivel freático



	Min [W/m]	Max [W/m]	Media [W/m]	Desviación Estándar [W/m]
sHE_NFNE_A_18h_R1	0	80	53,84	15,23
sHE_NFNE_B_18h_R1	0	80	52,79	13,91
sHE_NFNE_A_24h_R1	0	70	44,89	13,86
sHE_NFNE_B_24h_R1	0	70	43,93	12,55
sHE_NFNE_A_18h_R2	0	80	50,73	18,88
sHE_NFNE_B_18h_R2	0	80	49,73	17,71
sHE_NFNE_A_24h_R2	0	70	42,37	16,78
sHE_NFNE_B_24h_R2	0	70	41,45	15,63

### 5.2.3 Comparación de resultados

Los modelos generados a partir del método sHE se comparan con la investigación previa llevada a cabo en la ciudad de Talca [52], trabajo que determinó las zonas con mayor factibilidad para la instalación de sistemas geotérmicos verticales y horizontales cerrados, a partir del modelo del acuífero que se encuentra bajo la ciudad más la información litológica del sector que corresponde mayoritariamente a gravas y arenas. El potencial geotérmico fue determinado por interpolación mediante kriging ordinario omnidireccional con anisotropía en base a información de pozos con información estratigráfica a una escala 1:30.000 y considera un funcionamiento de la bomba de calor de 2400 horas al año.

Se observa que, pese a la diferencia en las escalas los valores de potencial obtenidos a partir de los modelos “Saturado” con un funcionamiento de 2400 horas al año propuestos en el presente estudio subestiman los potenciales geotérmicos del área que corresponde a la ciudad de Talca. Así el rango de valores obtenido a partir de los modelos a escala 1:1.000.000 para la ciudad de Talca se encuentran entre los 35-70 [W/m], mientras que los determinados a partir de un volumen mayor de información [52] lo estima en 43-86 [W/m]. Si suponemos que los valores obtenidos en la investigación realizada en Talca son correctos, pese a la diferencia en la escala de trabajo e información hidrogeológica disponible, el modelo propuesto en este estudio ofrece una correcta aproximación preliminar de los valores de potencial geotérmico de muy baja entalpía.

#### 5.2.4 Distribución e interpretación del potencial

En los mapas de potencial de energía geotérmica obtenidos a partir del método sHE se muestra el aumento del potencial geotérmico que se genera al considerar un régimen “Saturado” versus un régimen “No saturado” independiente del tiempo de funcionamiento considerado para el equipo. Como se mencionó en el capítulo anterior, el cambio en el valor de captación de calor específico en función de la presencia de agua se corresponde con las litologías clasificadas en el grupo A, las cuales se encuentran ampliamente distribuidas a lo largo del país, pero se concentran en las zonas correspondientes a la Cordillera de la Costa y la Depresión Central, mientras que en el dominio morfoestructural de la Cordillera de los Andes no se reconocen cambios en los valores de potenciales geotérmicos. Esto se explica debido a que las litologías presentes corresponden mayoritariamente a rocas volcánicas las cuales según los valores tabulados en la norma alemana VDI 4640 no varían su valor de captación de calor específico.

Los modelos confeccionados en el presente estudio son útiles para identificar áreas de mayor interés. Si no se dispone de información respecto a la presencia de agua es preferible considerar la evaluación de potencial geotérmico en condición “No saturado”, para evitar una sobre estimación del potencial geotérmico. Ahora bien, si se dispone de evidencia de la presencia de agua subterránea entonces los valores presentes en los modelos “Saturado” son más adecuados para evaluar la factibilidad de captaciones verticales con sistema cerrado o sistemas horizontales cerrados.

#### 5.2.5 Oportunidades de mejora

Los factores que inciden en las estimaciones con el Método sHE corresponden a:

- Información litológica

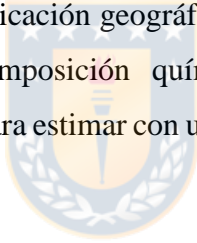
El valor de captación de calor específico (sHE) debe determinarse en función de las unidades litoestratigráfica del terreno, en la cual se disponga de la secuencia vertical y horizontal a fin de poder aplicar la ecuación (11) considerando como espesor la potencia de los estratos y determinar así el aporte de calor específico de cada uno. Dado que no se dispone de un mapa estratigráfico a escala nacional, el presente estudio se basó en el mapa de afloramiento de unidades geológicas, el cual demostró en la comparación realizada con el estudio llevado a cabo para la zona de Talca que logra entregar una estimación

preliminar que subestima los potenciales geotérmicos. Dadas estas deficiencias en la estimación es necesario disponer de mapas litoestratigráfico y de permeabilidad al menos a una escala 1:200.000 para obtener mapas con estimaciones más precisas similares a las realizados en España [3].

- Modelo hidrogeológico

El aumento del valor medio para los potenciales de energía geotérmica de entre 19 a 21% determinados para la condición “Saturado” en comparación con la “No saturado” muestra el impacto del nivel freáticos y su relación con los estratos. Como se ha hecho mención anteriormente Chile no dispone de una red de monitoreo del nivel de agua subterránea a escala nacional, lo que dificulta la construcción de modelos hidrogeológicos confiables.

Esta carencia estructural debería subsanarse mediante la creación en corto plazo de bases de datos que contengan mediciones de nivel estático, con un registro estandarizado de información respecto a su ubicación geográfica, temperatura, profundidad de pozo, nivel estático, estratigrafía y composición química del agua. Esto permitiría disponer información más adecuada para estimar con una menor incertidumbre el valor de potencial de energía geotérmica.



## 6 Conclusiones

En este trabajo se realizó una evaluación de los recursos geotérmicos de muy baja entalpía y se crearon mapas a escala regional del potencial geotérmico de muy baja entalpía disponible en el territorio continental de Chile.

La revisión bibliográfica permitió identificar 4 metodologías diferentes, con posibilidades de ser utilizadas para la evaluación propuesta. Todas ellas basadas en información geológica e hidrogeológica.

La recopilación y análisis de la información geológica e hidrogeológica disponible permitió determinar que los métodos más adecuados en este caso de estudio son el Método Volumétrico y el Método sHE. Además, los métodos seleccionados están ampliamente documentados en la bibliografía revisada, permiten realizar el trabajo a la escala definida y hacer uso de tecnologías GIS.

Las bases de datos accesibles públicamente que cumplen las características mínimas para desarrollar la evaluación aplicando los métodos seleccionados corresponden al mapa geológico de Chile a escala 1:1.000.000 del SERNAGEOMIN y la Actualización del Balance Hídrico Nacional.

Una de las principales limitaciones que se identifica para aplicar cualquiera de los métodos de evaluación identificados es la falta de información y disponibilidad de estudios referentes a las propiedades físicas de las diferentes litologías presentes en Chile. Este problema se solventa recurriendo a una recopilación bibliográfica, sin embargo, pone en evidencia la falta de determinados tipos de datos necesarios para llevar a cabo evaluaciones más precisas y detalladas del potencial geotérmico real del país.

En el caso del Método Volumétrico los parámetros requeridos son el calor específico, la conductividad térmica volumétrica y los flujos de calor geotérmicos.

En el Método sHE se requieren los valores de capción específicos, que son obtenidos en este caso a partir de la norma alemana DVI4640, después de contrastar bibliográficamente que es el referente internacional más importante y prestigioso.

Un aspecto importante que hay que considerar para interpretar las evaluaciones propuestas con cada uno de los 2 métodos es la forma en la que consideran la capacidad de explotación del recurso.

Mientras el Método SHE es un método explícito pensado para facilitar el desarrollo operativo de proyectos de explotación del recurso mediante bombas de calor geotérmico acopladas a un sistema de captación vertical cerrado, el Método Volumétrico es un método más genérico y menos explícito en términos de desarrollo operacional, pero permite hacer una evaluación del recurso más flexible un posible uso de tecnologías de captación horizontales o sistemas verticales abiertos.

En relación con los resultados obtenidos se pueden realizar las siguientes conclusiones:

- De los modelos obtenidos mediante el Método Volumétrico las zonas preliminarmente factibles para el aprovechamiento directo a través de bombas de calor acopladas a sistemas de captación verticales cerrados, se ubican preferentemente en el dominio morfoestructural de la Cordillera de los Andes y Depresión Central.
- Los menores valores de potenciales geotérmicos determinados del Método Volumétrico se ubican en la Cordillera de la Costa, pero esto no implica que el uso de bombas de calor acopladas a un sistema de captación geotérmico vertical cerrado no sean factibles, sino más bien sugiere la necesidad de evaluar otro sistema de captación ya sea horizontal o abierto.
- La comparación entre la evaluación del Método Volumétrico y los datos del modelo propuesto en Colina, determina que hay una sobrestimación del potencial de energía geotérmica del Método Volumétrico propuesto que se atribuye a la diferencia de escalas y de información utilizada.
- Las evaluaciones del Método Volumétrico son las que poseen una mayor incertidumbre, como consecuencia de la escasez de información y la necesidad de recurrir a la bibliografía para definir los valores de las propiedades físicas de las litologías presentes.
- En cuanto al Método sHE, la evaluación preliminar debe considerar las limitaciones de la información, pero se destaca como una herramienta muy buena y flexible en conjunto con el GIS. Este método permite obtener aproximaciones de factibilidad generales con

poca información, que son mejorables y escalables en función de la información disponible.

- Las litologías clasificadas en el grupo A son las que tienen una mayor incidencia sobre los mapas propuestos con el Método sHE. Como resultado, en los escenarios A y B, además se establece la importancia de conocer la existencia de agua subterránea y su nivel freático, y se cuantifica entre un 14 y 19% el aumento de la energía disponible en el subsuelo con presencia de agua si se compara a la condición “No saturada”, sin presencia de agua.
- La comparación entre los mapas resultantes del Método sHE y los propuestos para la ciudad de Talca, se determina que el Método sHE subestima los valores de potencial geotérmico. La discrepancia se atribuye a la diferencia de escala entre los dos estudios, así como a la cantidad y calidad de información utilizada.
- En general, la utilidad de los modelos desarrollados con el Método Volumétrico y el Método sHE es identificar áreas con alto potencial geotérmico y determinar en función de un valor de demanda térmica determinar una profundidad preliminar de pozo. Aunque dada la naturaleza de la metodología desarrolla se recomienda para áreas identificadas, llevar a cabo un estudio de detalle a menor escala, con el fin de determinar con mayor certeza la profundidad de perforación necesaria para la factibilidad en el uso de bomba de calor acopladas a un sistema de captación geotérmico vertical cerrado.

Por otro lado, se concluye que las metodologías de evaluación desarrolladas son replicables y se pueden mejorar incorporando parámetros e información adicional. Por ello se plantean las siguientes vías de mejora:

- Realizar estudios que permitan determinar la porosidad, calor efectivo y conductividad térmica de las principales litologías del mapa geológico de Chile a escala 1:100.000.
- Desarrollar bases de datos que recopilen y estandaricen la información de pozos, donde se registre el nivel estático, la temperatura, profundidad, composición química del fluido y la estratigrafía.
- Realizar estudios que determinen modelos litoestagraficos y de permeabilidad

- Incorporar la demanda energética a las metodologías desarrolladas para determinar las profundidades de perforación preliminares que requieren las bombas de calor acopladas a sistemas de captación geotérmicos.

Finalmente, se concluye que la metodología desarrollada en base a tecnología GIS es accesible, dinámica, escalable y permite mejorar las evaluaciones si se dispone de información adicional o más detallada, por lo que se considera una buena forma para desarrollar y fomentar el conocimiento sobre la energía geotérmica de muy baja entalpía y su potencial en Chile



## 7 REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Energía Gobierno de Chile, *Energía 2050 Política Energetica de Chile*. Santiago, 2015.
- [2] J. Renner and M. Reed, “8 Geothermal Energy,” in *Landolt-Börnstein - Group VIII: Advanced Materials and Technologies - Energy Technologies*, vol. 3C, 2006, pp. 177–188.
- [3] Tecnología y Recursos de la Tierra S.A, J. Sanchez Guzmán, L. Sanz López, and L. Ocaña Robles, *Evaluación del potencial de energía geotérmica. Estudio técnico PER 2011-2020*. Madrid, 2011.
- [4] G. Llopis Trillo and V. R. Angulo, *Guía de la Energía Geotérmica*. Madrid: Dirección General de Industria, Energía y Minas, 2008.
- [5] J. W. Lund and T. L. Boyd, “Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review,” *Geothermics*, vol. 60, pp. 66–93, 2016.
- [6] Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Industriales de Madrid, “VDI 4640 Parte 1 Definiciones, licencias y aspectos medioambientales,” 2013. Recuperado de: <http://www.coitim2.es/coitim/cms/repositorios/RepositorioDetalle.asp?IdMenu=106&IdRepositorio=113&IdRepositorioDocumento=1>.
- [7] EGEC Geothermal, “Geothermal : a key source for our clean energy transition,” 2018. Recuperado de: <https://www.egec.org/wp-content/uploads/2018/01/EGEC-PR-on-Plenary-vote.pdf>.
- [8] European Commission, *Atlas of Geothermal Geothermal Resources in Europe*. Luxembourg, 2002.
- [9] A. Lahsen *et al.*, “Present Status of Geothermal Exploration in Chile,” *Proc. World Geotherm. Congr.*, pp. 24–29, 2005.
- [10] A. García-Gil *et al.*, “GIS-supported mapping of low-temperature geothermal potential taking groundwater flow into account,” *Renew. Energy*, vol. 77, pp. 268–278, 2015.
- [11] K. Schiel, O. Baume, G. Caruso, and U. Leopold, “GIS-based modelling of shallow geothermal energy potential for CO2 emission mitigation in urban areas,” *Renew. Energy*, vol. 86, pp. 1023–1036, 2016.
- [12] A. Gemelli, A. Mancini Adriano, and S. Longhi, “GIS-based energy-economic model of low temperature geothermal resources: A case study in the Italian Marche region,” *Renew. Energy*, vol. 36, no. 9, pp. 2474–2483, 2011.
- [13] M. Procesi, M. Buttinelli, and M. Pignone, “Geothermal favourability mapping by advanced geospatial overlay analysis : Tuscany case study ( Italy ),” *Energy*, vol. 90, pp. 1377–1387, 2015.
- [14] D. Viesi, A. Galgaro, P. Visintainer, and L. Crema, “Geothermics GIS-supported evaluation and mapping of the geo-exchange potential for vertical closed-loop systems in an Alpine valley , the case study of Adige Valley (Italy),” *Geothermics*, vol. 71, pp. 70–87, 2018.
- [15] S. Signorelli and T. Kohl, “Regional ground surface temperature mapping from meteorological data,” *Glob. Planet. Change*, vol. 40, no. 3–4, pp. 267–284, 2004.



- [16] I. Iosif Stylianou, S. Tassou, P. Christodoulides, I. Panayides, and G. Florides, "Measurement and analysis of thermal properties of rocks for the compilation of geothermal maps of Cyprus," *Renew. Energy*, vol. 88, pp. 418–429, 2016.
- [17] E. Barbier, "Geothermal energy technology and current status: An overview," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 6, no. 1–2, pp. 3–65, 2002.
- [18] P. Muffler and R. Cataldi, "Methods for regional assesment of geothermal resources," vol. 7, pp. 53–89, 1978.
- [19] A. Allansdottir, A. Pellizzone, and A. Sciuolo, *Geothermal energy and society*, vol. 67. Cham, Switzerland: Springer, 2019.
- [20] IRENA, *International Renewable Energy Agency. Renewable Power Generation Costs in 2017*. Abu Dhabi, 2018.
- [21] L William E. Glassley, *Geothermal Energy Renewable Energy and the Environment*. 2010.
- [22] S. Bruni, "Una nueva serie sobre la innovación de energía. La Energía Geotérmica," *Cent. Innovación Energética*, pp. 1–10, 2016.
- [23] P. Perovic *et al.*, *Guía técnica de diseño de sistemas de intercambio geotérmico de circuito cerrado*. Madrid: IDAE, 2012.
- [24] PROMOEENER-A, "Guia metodológica de aprovechamiento de recursos geotérmicos de muy baja temperatura," Mérida, 2013.
- [25] European Federation of Geologists *et al.*, *Geotrained training manual for drillers shallow geothermal systems*. Brussels: GEOTRAINET, 2011.
- [26] Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Industriales de Madrid, "VDI 4640 parte 2 Sistemas de bomba de calor conectados al subsuelo," 2013. Recuperado de: <http://www.coitim2.es/coitim/cms/repositorio/RepositorioDetalle.asp?IdMenu=106&IdRepositorio=113&IdRepositorioDocumento=2>.
- [27] L. Rybach, J. Wilhelm, and H. Gorhan, "Geothermal use of tunnel waters – a Swiss speciality," *Int. Geotherm. Conf.*, pp. 17–23, 2003.
- [28] R. Verhoeven *et al.*, "Minewater 2.0 project in Heerlen the Netherlands: Transformation of a geothermal mine water pilot project into a full scale hybrid sustainable energy infrastructure for heating and cooling," *Energy Procedia*, vol. 46, pp. 58–67, 2014.
- [29] International Renewable Energy Agency (IRENA), *Renewable capacity statistics 2019*,. Abu Dhabi, 2019.
- [30] V. Masjuan Torres, "Seminario sobre los recursos energeticos de Chile - Generalidades sobre la geotermia," Santiago, 1974.
- [31] P. Sanchez-Alfaro *et al.*, "Geothermal barriers, policies and economics in Chile - Lessons for the Andes," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 1390–1401, 2015.
- [32] M. Procesi, "Geothermal potential evaluation for northern chile and suggestions for new energy plans," *Energies*, vol. 7, no. 8, pp. 5444–5459, 2014.
- [33] M. Taussi *et al.*, "Sealing capacity of clay-cap units above the Cerro Pabellón hidden geothermal system ( northern Chile ) derived by soil CO2 flux and temperature measurements,"

- J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 384, pp. 1–14, 2019.
- [34] J. F. Mackenna, J. M. Bustamante, and M. J. Barros, “BBA - Geothermal Transparency Guide.” Recuperado de: <http://www.geothermal.bba.is/country/chile>.
- [35] Aiguasol, “Estado de desarrollo de proyectos de bombas de calor geotérmicas instalados en Chile,” Santiago, 2016.
- [36] Piensa O’higgins, “‘ Energía Geotérmica De Muy Baja Entalpía ’ Unidad De Vigilancia Tecnológica,” Rancagua, 2017.
- [37] A. Dufey, “Opportunities and domestic barriers to clean energy investment in Chile,” Winnipeg, 2010.
- [38] M. Saldivia, “Análisis de legislación comparada sobre energía geotérmica,” Santiago, 2018.
- [39] S. Vargas Payera, “Understanding social acceptance of geothermal energy: Case study for Araucanía region, Chile,” *Geothermics*, vol. 72, pp. 138–144, 2018.
- [40] S. Woodhouse and P. Meisen, “Renewable Energy Potential of Chile,” San Diego, 2011.
- [41] Comisión de Minería y Energía, “Informe de la comisión de minería y energía recaído en el proyecto de ley que perfecciona la ley N°19.657 sobre concesiones de energía geotérmica para el desarrollo de proyectos de aprovechamiento somero de energía geotérmica,” Santiago, 2020.
- [42] Ministerio de Vivienda y Urbanismo Gobierno de Chile, “Planes de Descontaminación Atmosférica - Ministerio de Vivienda y Urbanismo.” Recuperado de: <https://www.minvu.cl/planes-de-descontaminacion-atmosferica/>.
- [43] Ministerio de Desarrollo Social y Familia / Gobierno de Chile, “Innova FOSIS 2020.” Recuperado de: <https://innova.fosis.cl/es/>.
- [44] S. Otero, “Fighting the Information Gap and the Steam Monster, the Chilean Experience on Geothermal Outreach,” *Proc. World Geotherm. Congr.*, pp. 19–25, 2015.
- [45] Instituto Nacional de Estadísticas (INE) - Chile, “Resultados CENSO 2017.” Recuperado de: <http://resultados.censo2017.cl/>.
- [46] Ministerio de Vivienda y Urbanismo - Minvu, *Estándares de construcción sustentable para viviendas en Chile Tomo N° 2 Energía*. Santiago, 2018.
- [47] S. J. Schön, “Thermal Properties,” *Handb. Pet. Explor. Prod.*, vol. 8, pp. 337–372, 2011.
- [48] Agencia Andaluza de la Energía, “Anexo 1. Metodología de Evaluación,” Sevilla, 2011.
- [49] J. L. PIKUL, “Estimating soil surface temperature from meteorological data,” *soil Sci.*, vol. 151, no. 3, pp. 187–195, 1991.
- [50] D. Aravena and A. Lahsen, “A geothermal favorability map of Chile, preliminary results,” *Trans. - Geotherm. Resour. Counc.*, vol. 37, no. PART 2, pp. 923–926, 2013.
- [51] M. Muñoz *et al.*, “Estimating low-enthalpy geothermal energy potential for district heating in Santiago basin-Chile (33.5°S),” *Renew. Energy*, vol. 76, pp. 186–195, 2015.
- [52] J. A. Schorr Rubio, “Cuantificación del potencial geotérmico de baja temperatura, mediante sistemas de información geográfica, para la implementación de bombas de calor geotérmicas para calefacción en la ciudad de Talca,” Memoria de título, Geología. Universidad de Chile,

- 2017.
- [53] C. J. Oñate Rivas, “Determinación de zonas aptas para implementar bombas de calor geotérmicas y estimación de su potencial térmico en la región metropolitana,” Memoria de título, Geología. Universidad de Chile, 2017.
- [54] N. Valenzuela, “Estimación del potencial de energía geotérmica de baja entalpía y sus posibles aplicaciones en la comuna de colina, región metropolitana.,” Memoria de título, Geología. Universidad de Chile, 2013.
- [55] R. M. Prol-Ledesma, “Evaluation of the reconnaissance results in geothermal exploration using GIS,” *Geothermics*, vol. 29, no. 1, pp. 83–103, 2000.
- [56] M. Kiavarz and M. Jelokhani-Niaraki, “Geothermal prospectivity mapping using GIS-based Ordered Weighted Averaging approach: A case study in Japan’s Akita and Iwate provinces,” *Geothermics*, vol. 70, pp. 295–304, 2017.
- [57] E. J. M. Carranza, H. Wibowo, S. D. Barritt, and P. Sumintadireja, “Spatial data analysis and integration for regional-scale geothermal potential mapping, West Java, Indonesia,” *Geothermics*, vol. 37, no. 3, pp. 267–299, 2008.
- [58] M. Yalcin and F. Kilic Gul, “A GIS-based multi criteria decision analysis approach for exploring geothermal resources: Akarcay basin (Afyonkarahisar),” *Geothermics*, vol. 67, pp. 18–28, 2017.
- [59] Y. Noorollahi, H. Gholami Arjenaki, and R. Ghasempour, “Thermo-economic modeling and GIS-based spatial data analysis of ground source heat pump systems for regional shallow geothermal mapping,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 72, pp. 648–660, 2017.
- [60] Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) Gobierno de Chile, “Mapa geológico de Chile: version digital,” 2003. Recuperado de: <http://www.ipgp.fr/~dechabal/Geol-millon.pdf>.
- [61] Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) Gobierno de Chile, “Tienda E-MAPS.” Recuperado de: <http://tienda.sernageomin.cl/TiendaVirtual2/ProductDetail.aspx?pid=1949>.
- [62] DGA (2017), “Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile.”
- [63] J. Schön, *Physical Properties of Rocks: A Workbook*. Amsterdam: Elsevier, 2011.
- [64] E. Chekhonin *et al.*, “Cuando las rocas se calientan : Las propiedades térmicas de las rocas yacimiento,” *Oildf. Rev. Schlumberger*, vol. 24, no. 3, pp. 20–37, 2012.
- [65] H. D. Vosteen and R. Schellschmidt, “Influence of temperature on thermal conductivity, thermal capacity and thermal diffusivity for different types of rock,” *Phys. Chem. Earth*, vol. 28, no. 9–11, pp. 499–509, 2003.
- [66] V. M. Hamza and M. Muñoz, “Heat flow map of South America,” *Geothermics*, vol. 25, no. 6, pp. 599–621, 1996.

## 8 ANEXOS A: Tablas

Tabla 8-1 Proyectos a nivel nacional de uso de energía geotérmica. Fuente [35]

N°	Proyecto	Localización	Información adicional
1	Invernadero Hortícola	Camino Lampa 3200 Región Metropolitana	Bomba de calor empleado en la producción de berros Empresa: Enativa. 18 millones Cofinanciamiento de la fundación para la Innovación Agraria (FIA) del ministerio de Agricultura
2	Viña Maquis; bodega de vinificación.	Palmilla. VI región.	Inversión aproximada \$ 220 millones Cofinanciamiento de la fundación para la Innovación Agraria (FIA) del ministerio de Agricultura
3	Colegio alemán de Puerto Varas.	Puerto Varas. X región.	Bomba de calor para calefacción
4	Edificio Transoceánica	Región Metropolitana	
5	“Parque Científico Tecnológico” de la Universidad Católica del Maule (UCM). CEGA	VII región.	Climatización de este edificio funciona con energía geotérmica de baja entalpía, con intercambiadores verticales de calor.
6	Centro de Salud Familiar (CESFAM)	Calbuco. X Región.	Climatización que utiliza el recurso geotérmico para temperar los cerca de 1.700 m <sup>2</sup> construidos.
7	Escuela Rural Linares de Casma CEGA	X región.	La calefacción del recinto y el agua caliente del internado funciona con bombas de calor geotérmicas La superficie construida es de 3.400 m <sup>2</sup> , y cuenta con gimnasio, biblioteca, salas de computación y casino. Mantiene una calefacción eficiente gracias a un sistema de aislación con termo paneles.
8	Hotel Termas de Puyehue CEGA	Ruta Internacional 215, km76, Camino a Antillanca km 4, Puyehue. X Región.	Proyecto de energía geotérmica que permite aprovechar las aguas termales para calefacción de las habitaciones y agua caliente sanitaria. Inversión cercana a los \$200 millones.
9	Parque Titanium	Región Metropolitana.	Climatización de la torre de 6.000 m <sup>2</sup> . Empresa Sencorp.
10	Calefacción de viviendas sociales comuna Santa Juana	VIII región.	Calefacción para viviendas sociales. Proyecto que cuenta con el apoyo del Gobierno alemán. Empresa BB Solution .
11	Secador Geotérmico Industria de la madera	Santa Juana. VIII región.	Empresa: Improve Ltda. Inversión estimada: \$20 millones
12	Hogar hermanita de los pobres	Manuel Rodríguez, Concepción. VIII región.	Empresa Enalteco. Inversión estimada \$ 130 millones.
13	Hotel Quelen	Lago Lanalhue, Cañete. VIII región.	Empresa: Enalteco. Inversión estimada: \$30 millones.

14	Viveros bosques Arauco Industria de la madera	Viveros Laraquete. VIII región.	Empresa: Enalteco. Inversión estimada: \$45 millones.
15	Particular	Chillan VII Región	Empresa: Enalteco. Inversión estimada: \$7 millones.
16	Piscina temperada	Chiguayante. VIII región.	Empresa: Enalteco. Inversión estimada: \$ 7 millones.
17	Particular	Lomas San Sebastián, Concepción.	Empresa: Enalteco. Inversión estimada: \$ 8 millones.
18	Unifruitti San Felipe	Michimalongo 220, San Felipe. V región.	Empresa: Enativa. Inversión estimada: \$ 20 millones.
19	Casa familia Silva	Condominio Las Canteras sitio 9, Colina. Región Metropolitana	Empresa: Enativa. Inversión estimada; \$ 14 millones.
20	Casa familia Salazar	Condominio Polo de Chicureo II, sitio 46. Región Metropolitana.	Empresa: Enativa. Inversión estimada: \$15 millones.
21	Condominio Las Tortolas	Camino Santa Rita, Condominio Las Tortolas, Pirque. Región Metropolitana.	Empresa: Voher. Inversión estimada: \$ 15 millones.
22	Forestal Arauco Vivero Horcones	Laraquete, ruta 160, Horcones: Al interior del complejo forestal Industrial Horcones. VIII región.	Empresa: Voher. Inversión estimada: \$ 200 millones
23	Casas La Reina	La Reina. Región Metropolitana.	Empresa: ECM S.A.
24	Centro Logístico	San Miguel Región Metropolitana	Empresa: ECM S.A. Inversión estimada: \$ 75 millones.
25	Arauco: Horcones Industria de pastas de madera, papel y cartón	Los Horcones s/n – Arauco. VIII región.	Empresa: Geomarket SpA. Inversión estimada: \$ 450 millones.
26	Casas Habitacionales	Los Angeles, Colina Región Metropolitana	Empresa: ODEN. Inversión estimada \$ 6-12 millones
27	Edificio Costa Mar Azotea Edificio Costa	La Herradura, Coquimbo.	Empresa: Rgs Energía. Inversión estimada: \$83 millones.
28	Hospital el Salvador	Avda. El Salvador, Santiago. Región Metropolitana	Empresa: Improve Ltda.
29	Edificio Ezzati	Alonso de Ribera 2850, Campus San Andrés, Universidad Católica de la Santísima Concepción. VIII región.	Empresa: Improve Ltda. Inversión estimada: \$ 50 millones.
30	Condominio de los Ríos Low	Piedra Roja, Santiago. Región Metropolitana.	Empresa: EE Chile.
31	Edificio cumbres del Sur	Temuco. IX región.	Empresa: EE Chile.
32	Centro Integral del adulto mayor	Viña del Mar. V región.	Empresa: EE Chile.
33	Centro integral del adulto mayor	Maipú. Región Metropolitana.	Empresa: EE Chile.

34	Hotel Playa Grande Suites	Pucón. IX región	Empresa: Ferrosur.
35	Hospital Regional	Rancagua. VI región	Climatización. Superficie construida 90.000 m2.

Tabla 8-2 Tipos de concesiones geotérmicas en Chile. Fuente [38].

Tipo de concesión	Derecho	Periodo de concesión	Área máxima
Concesión de exploración	Para realizar mediciones, estudios, investigaciones con el objetivo de determinar la existencia de fuentes de recursos geotérmicos	Dos años, prorrogable una sola vez, por un periodo de dos años más acreditando avance no inferior al 25% en materialización de inversión	Cien mil hectáreas
Concesión de explotación	Para utilizar y aprovechar la energía geotérmica que exista dentro de sus límites	Indefinida	Veinte mil hectáreas

Tabla 8-3 Coberturas utilizadas para creación de mapa de potencial térmico de baja entalpía.

Cobertura	Descripción	Fuente	Sitio de descarga
Geología	Capa que contiene la información geológica de Chile	Mapa geológico de escala 1:1000000 Chile,	<a href="http://tienda.servageomin.cl/TiendaVirtual2/ProductDetail.aspx?pid=1949">http://tienda.servageomin.cl/TiendaVirtual2/ProductDetail.aspx?pid=1949</a>
Capitales	Capa que contiene la localización de las capitales regionales de Chile	Mapa geológico de escala 1:1000000 Chile,	
Límite de Chile Continental	Capa que contiene los límites continentales de Chile	Mapa geológico de escala 1:1000000 Chile,	
Dominios Morfoestructurales	Capa que contiene los dominios morfoestructurales de Chile	Mapa geológico de escala 1:1000000 Chile,	
Polígono de Acuerdo	Capa que tiene el polígono de acuerdo de 1998	Mapa geológico de escala 1:1000000 Chile,	<a href="http://sad.dga.cl/">http://sad.dga.cl/</a>
Ubicación de pozos	Localización de los 278 pozos utilizados con la finalidad de obtener información sobre el nivel estático de las aguas subterráneas	Actualización del Balance Hídrico Nacional	
Datos Hidrogeográficos	Capa que contiene la ubicación de ríos y efluentes	Actualización del Balance Hídrico Nacional	
Sudamérica	Capa que contiene un polígono con la división política administrativa de Sudamérica.	Actualización del Balance Hídrico Nacional	

Tabla 8-4 Análisis comparativo de disponibilidad de información para cada metodología.

Metodología	Parámetros de entrada	Disponible en cobertura GIS	Disponible en Bibliografía
Método Volumétrico	P	NO	SI
	T	NO	SI
	A	SI	-
	$\rho_m$	NO	SI
	$c_m$	NO	SI
	$\rho_w$	NO	SI
	$c_m$	NO	SI
Método del Flujo térmico superficial	A	SI	-
	q	NO	SI
	Q	NO	-
	C	NO	SI
	T	NO	-
	Ta	SI	-
Método de sHE ( <i>specific heat exchnager</i> )	Tipo roca	SI	-
	sHE	NO	SI
Método Balance energético de Pikul	T	SI	-
	$Q_h$	NO	-
	$\rho C_p$	NO	SI
	k	SI	-
	$u_*$	NO	-
	z	NO	-
	z <sub>0</sub>	NO	-
	d	NO	-
	$\psi_m$	NO	-

Tabla 8-5. Resumen datos ROCA1. Atributo del “Polígono Geología” presente en la cobertura GIS Mapa geológico de Chile escala 1:1.000.000.

Tipo	Litología	N° de Polígonos	Área (m2)	Porcentaje Área total
ROCA 1		297	28735328776	3,8
ROCA 1	Andesita	907	50998486328	6,8
ROCA 1	andesita basáltica	69	2859032522	0,4
ROCA 1	Arena	230	4928251313	0,7
ROCA 1	Arenisca	571	36459853086	4,8
ROCA 1	arenisca cuarcífera	47	731496579	0,1
ROCA 1	arenisca cuarzofeldespática	62	655528702	0,1
ROCA 1	Basalto	1118	45214074164	6,0
ROCA 1	Bloque	641	30234986971	4,0
ROCA 1	Brecha	257	6226790785	0,8
ROCA 1	brecha sedimentaria	117	6789653295	0,9
ROCA 1	brecha volcanoclastica	4	96328118	0,0
ROCA 1	Caliza	587	17337464265	2,3
ROCA 1	Chert	77	1956908701	0,3
ROCA 1	Conglomerado	1230	46773812610	6,2
ROCA 1	Coquina	85	2619803814	0,4
ROCA 1	Cuarcita	5	128510074	0,0
ROCA 1	Dacita	270	8160183820	1,1
ROCA 1	deposito aluvial	1147	49353508577	6,5
ROCA 1	deposito de avalancha volcánica	26	3618209129	0,5
ROCA 1	deposito de remocion en masa	7	440468567	0,1
ROCA 1	Diorita	389	14856297361	2,0



ROCA 1	Esquisto	137	2367371706	0,3
ROCA 1	esquisto micáceo	164	10580672550	1,4
ROCA 1	esquisto pelítico	129	15656249151	2,1
ROCA 1	Gabro	87	4031347821	0,5
ROCA 1	Granito	1435	105620691789	14,0
ROCA 1	Granodiorita	963	30735175483	4,1
ROCA 1	Grava	1404	60059138461	8,0
ROCA 1	Ignimbrita	39	1096809789	0,2
ROCA 1	Limo	37	3203825792	0,4
ROCA 1	Limolita	12	3173546761	0,4
ROCA 1	Metamórfica	8	206715767	0,0
ROCA 1	Metapelita	34	1252566130	0,2
ROCA 1	Metarenisca	319	25600273245	3,4
ROCA 1	Metasedimentaria	4	394581830	0,1
ROCA 1	Metaturbidita	66	2252241028	0,3
ROCA 1	Microdiorita	7	449792605	0,1
ROCA 1	Monzodiorita	574	13779659696	1,8
ROCA 1	monzodiorita cuarcífera	309	12697962553	1,7
ROCA 1	Ortogneis	9	228905508	0,0
ROCA 1	Pizarra	7	5310875950	0,7
ROCA 1	porfido andesítico	69	497234936	0,1
ROCA 1	porfido dacítico	88	390455542	0,1
ROCA 1	porfido granodiorítico	16	56496967	0,0
ROCA 1	Relave	23	190102089	0,0
ROCA 1	Riolita	33	1147481795	0,2
ROCA 1	Sedimentario	384	15864510936	2,1
ROCA 1	sedimentario químico	90	8016888326	1,1
ROCA 1	Serpentinita	1	64745060	0,0
ROCA 1	Toba	9	832713205	0,1
ROCA 1	Tufita	34	627629540	0,1
ROCA 1	Turbidita	6	535112297	0,1
ROCA 1	Volcánica	6	79570905	0,0
ROCA 1	volcanico piroclástico	992	68721918287	9,1

Tabla 8-6. Resumen datos ROCA2. Atributo del “Polígono Geología” presente en la cobertura GIS Mapa geológico de Chile escala 1:1.000.000.

Tipo	Litología	N° de Polígonos	Área (m2)	Porcentaje Área total
ROCA 2		853	65443592254	8,7
ROCA 2	Adakita	11	2172862456	0,3
ROCA 2	Andesita	758	22984394552	3,0
ROCA 2	andesita basáltica	530	31166070430	4,1
ROCA 2	Anfibolita	134	2158534177	0,3
ROCA 2	Arcilla	18	1300245339	0,2
ROCA 2	Arcillolita	84	8493743688	1,1
ROCA 2	Arena	1500	64037057739	8,5
ROCA 2	Arenisca	1298	48873173913	6,5
ROCA 2	arenisca calcárea	349	13233663700	1,8
ROCA 2	arenisca cuarcífera	17	435967354	0,1
ROCA 2	arenisca cuarzofeldespatica	5	128510074	0,0
ROCA 2	Basalto	294	8093955431	1,1
ROCA 2	Brecha	71	1158368205	0,2
ROCA 2	brecha volcánica	88	5819837637	0,8
ROCA 2	Calcarenita	58	1697601566	0,2
ROCA 2	caliza estramatolítica	22	466953755	0,1
ROCA 2	Chert	48	2500075978	0,3
ROCA 2	Conglomerado	306	19265931057	2,6
ROCA 2	Coquina	24	1563297279	0,2
ROCA 2	Dacita	1109	72758297053	9,6
ROCA 2	deposito de avalancha volcánica	7	440468567	0,1
ROCA 2	deposito glacialfluvial	1147	49353508577	6,5
ROCA 2	Diabasa	87	4031347821	0,5
ROCA 2	Diorita	1008	41482361039	5,5
ROCA 2	Filita	459	39828116090	5,3
ROCA 2	Gabro	140	5003376684	0,7
ROCA 2	Granodiorita	1817	110834209648	14,7

ROCA 2	Grava	69	1513762948	0,2
ROCA 2	Limo	641	30234986971	4,0
ROCA 2	Limolita	76	2897286739	0,4
ROCA 2	limolita calcárea	5	143808437	0,0
ROCA 2	Lutita	336	12398320825	1,6
ROCA 2	Metabasita	19	1617520942	0,2
ROCA 2	Metachert	34	1252566130	0,2
ROCA 2	Microgabro	7	449792605	0,1
ROCA 2	Migmatita	16	440766543	0,1
ROCA 2	Monzodiorita	250	9917665737	1,3
ROCA 2	Monzogranito	173	4132359387	0,5
ROCA 2	Ortoconglomerado	47	731496579	0,1
ROCA 2	Paraconglomerado	26	532691198	0,1
ROCA 2	porfido andesítico	88	390455542	0,1
ROCA 2	porfido dacítico	24	107177089	0,0
ROCA 2	porfido diorítico	45	390057847	0,1
ROCA 2	porfido granítico	82	3467211712	0,5
ROCA 2	porfido monzonítico	16	56496967	0,0
ROCA 2	Riolita	629	28385654853	3,8
ROCA 2	Sedimentario	34	627629540	0,1
ROCA 2	Toba	185	11691418788	1,5
ROCA 2	toba de ceniza	4	96328118	0,0
ROCA 2	Tonalita	201	2917347736	0,4
ROCA 2	volcanico piroclástico	389	15779915763	2,1

Tabla 8-7 Valores asignados en tablas de atributos, calor específico Volumétrico y conductividad térmica en función de la litología presente en la variable ROCA1

Tipo	Litología	Conductividad Térmica W/mk	Calor específico Mj/m³K
ROCA 1		1,55	2
ROCA 1	Andesita	1,3	2,3
ROCA 1	Andesita basáltica	1,3	2,3
ROCA 1	Arena	0,4	1,5
ROCA 1	Arenisca	1,9	2,1
ROCA 1	Arenisca cuarcífera	1,9	1,8
ROCA 1	Arenisca cuarzofeldespatica	1,9	2,1
ROCA 1	Basalto	1,3	2,3
ROCA 1	Bloque	2,1	2,2
ROCA 1	Brecha	1,6	2
ROCA 1	Brecha sedimentaria	2,1	2,2
ROCA 1	Brecha volcanoclastica	1,6	2
ROCA 1	Caliza	2	2,1
ROCA 1	Chert	2,1	2,2
ROCA 1	Conglomerado	1,3	1,8
ROCA 1	Coquina	2,1	2,2
ROCA 1	Cuarcita	1,5	2,1
ROCA 1	Dacita	1,6	2
ROCA 1	Deposito aluvial	2,1	2,2

ROCA 1	Depósito de avalancha volcánica	1,6	2
ROCA 1	Depósito de remoción en masa	1,6	2
ROCA 1	Diorita	2	2,5
ROCA 1	Esquisto	1,5	2,2
ROCA 1	Esquisto micáceo	1,5	1,8
ROCA 1	Esquisto pelítico	1,3	2,3
ROCA 1	Gabro	1,7	2
ROCA 1	Granito	2,1	2,1
ROCA 1	Granodiorita	1,3	2,3
ROCA 1	Grava	0,4	1,3
ROCA 1	Ignimbrita	1,6	2
ROCA 1	Limo	1,1	1,5
ROCA 1	Limolita	2,1	1,9
ROCA 1	Metamórfica	1,5	2,1
ROCA 1	Metapelita	1,5	2,1
ROCA 1	Metarenisca	1,5	2,1
ROCA 1	Metasedimentaria	1,5	2,1
ROCA 1	Metaturbidita	1,5	2,1
ROCA 1	Microdiorita	1,6	2
ROCA 1	Monzodiorita	1,6	2
ROCA 1	Monzodiorita cuarcífera	1,6	2
ROCA 1	Ortogneis	1,9	1,8
ROCA 1	Pizarra	1,5	2,2
ROCA 1	Porfido andesítico	1,6	2
ROCA 1	Porfido dacítico	1,6	2
ROCA 1	Porfido granodiorítico	1,6	2
ROCA 1	Relave	2,1	2,2
ROCA 1	Riolita	3,1	2
ROCA 1	Sedimentario	2,1	2,2
ROCA 1	Sedimentario químico	2,1	2,2
ROCA 1	Serpentinita	1,5	2,1
ROCA 1	Toba	1,1	2
ROCA 1	Tufita	1,6	2
ROCA 1	Turbidita	2,1	2,2
ROCA 1	Volcánica	1,6	2
ROCA 1	Volcanico piroclástico	1,6	2

Tabla 8-8 Valores asignados en tablas de atributos, calor específico Volumétrico y conductividad térmica en función de la litología presente en la variable ROCA2

Tipo	Litología	Conductividad Térmica W/mk	Calor específico Mj/m³K
ROCA 2		1,55	2
ROCA 2	Adakita	1,3	2,3
ROCA 2	Andesita	1,3	2,3
ROCA 2	Andesita basáltica	1,3	2,3
ROCA 2	Anfibolita	2,5	2,1
ROCA 2	Arcilla	1,6	1,6
ROCA 2	Arcillolita	1,6	1,6
ROCA 2	Arena	0,4	1,5
ROCA 2	Arenisca	1,9	2,1
ROCA 2	Arenisca calcárea	1,9	1,8
ROCA 2	Arenisca cuarcífera	1,9	2,1
ROCA 2	Arenisca cuarzofeldespática	1,9	2,1
ROCA 2	Basalto	1,3	2,3
ROCA 2	Brecha	1,6	2
ROCA 2	Brecha volcánica	1,6	2
ROCA 2	Calcarenita	1,3	2,1
ROCA 2	Caliza estramatolítica	2	2,1
ROCA 2	Chert	2,1	2,2
ROCA 2	Conglomerado	1,3	1,8
ROCA 2	Coquina	2,1	2,2
ROCA 2	Dacita	1,6	2
ROCA 2	Depósito de avalancha volcánica	1,6	2
ROCA 2	Depósito glacial	1,6	2
ROCA 2	Diabasa	1,7	2
ROCA 2	Diorita	2	2,5
ROCA 2	Filita	2,5	2,1
ROCA 2	Gabro	1,7	2
ROCA 2	Granodiorita	1,3	2,3
ROCA 2	Grava	0,4	1,3
ROCA 2	Limo	1,1	1,5
ROCA 2	Limolita	2,1	1,9
ROCA 2	Limolita calcárea	2,1	1,9
ROCA 2	Lutita	1,5	2,5
ROCA 2	Metabasita	2,5	2,1

ROCA 2	Metachert	2,5	2,1
ROCA 2	Microgabro	1,7	2
ROCA 2	Migmatita	1,3	2,3
ROCA 2	Monzodiorita	1,6	2
ROCA 2	Monzogranito	2,1	2,1
ROCA 2	Ortoconglomerado	1,6	2,3
ROCA 2	Paraconglomerado	1,6	2,3
ROCA 2	Porfido andesítico	1,6	2
ROCA 2	Porfido dacítico	1,6	2
ROCA 2	Porfido diorítico	1,6	2
ROCA 2	Porfido granítico	1,6	2
ROCA 2	Porfido monzonítico	1,6	2
ROCA 2	Riolita	3,1	2
ROCA 2	Sedimentario	2,1	2,2
ROCA 2	Toba	1,1	2
ROCA 2	Toba de ceniza	1,1	2
ROCA 2	Tonalita	1,3	2,3
ROCA 2	Volcanico piroclástico	1,6	2

Tabla 8-9. Clasificación y asignación de valor de captación de calor específico para las litologías pertenecientes a las variables ROCA1 y ROCA2 en base a procedimiento descrito en la Figura 4.4.

Tipo de rocas	Litología	Grupo	sHE [W/m] No saturado		sHE [W/m] Saturado	
			1800 h	2400 h	1800 h	2400 h
			Volcánicas	Andesita	E	50
	andesita basáltica	E	50	40	50	40
	Basalto	E	50	40	50	40
	Brecha	E	50	40	50	40
	brecha volcanoclastica	E	50	40	50	40
	Dacita	E	50	40	50	40
	deposito de avalancha volcanica	E	50	40	50	40
	deposito de remocion en masa	E	50	40	50	40
	Diorita	E	50	40	50	40
	Gabro	E	50	40	50	40
	Granito	E	50	40	50	40
	Granodiorita	E	50	40	50	40
	Igimbrita	E	50	40	50	40
	Microdiorita	E	50	40	50	40
	monzodiorita	E	50	40	50	40
	monzodiorita cuarcifera	E	50	40	50	40
	porfido andesitico	E	50	40	50	40
	porfido dacitico	E	50	40	50	40
	porfido granodioritico	E	50	40	50	40
	Toba	E	50	40	50	40
	Riolita	E	50	40	50	40
	Tufita	E	50	40	50	40
	Volcánica	E	50	40	50	40

	volcanico piroclastico	E	50	40	50	40
Sedimentarias	Arena	A	20	15	80	70
	Arenisca	A	20	15	80	70
	arenisca cuarcifera	A	20	15	80	70
	arenisca cuarzofeldespatica	A	20	15	80	70
	Bloque	C	40	35	40	35
	brecha sedimentaria	C	40	35	40	35
	Caliza	D	60	50	60	50
	Chert	C	40	35	40	35
	conglomerado	D	60	50	60	50
	Coquina	C	40	35	40	35
	deposito aluvial	D	60	50	60	50
	grava seca	A	20	15	80	70
	Limo	A	20	15	80	70
	Limolita	A	20	15	80	70
	Relave	C	40	35	40	35
	sedimentario	C	40	35	40	35
	sedimentario quimico	C	40	35	40	35
Turbidita	C	40	35	40	35	
Metamórfica	Cuarcita	F	70	65	70	65
	Esquisto	F	70	65	70	65
	esquisto micaceo	F	70	65	70	65
	esquisto pelitico	F	70	65	70	65
	metamorfica	D	60	50	60	50
	Metapelita	D	60	50	60	50
	Metarenisca	D	60	50	60	50
	metasedimentaria	D	60	50	60	50
	metaturbidita	D	60	50	60	50
	Ortogneis	F	70	65	70	65
	Pizarra	D	60	50	60	50
	Serpentinita	D	60	50	60	50



## 9 ANEXOS B: Esquemas

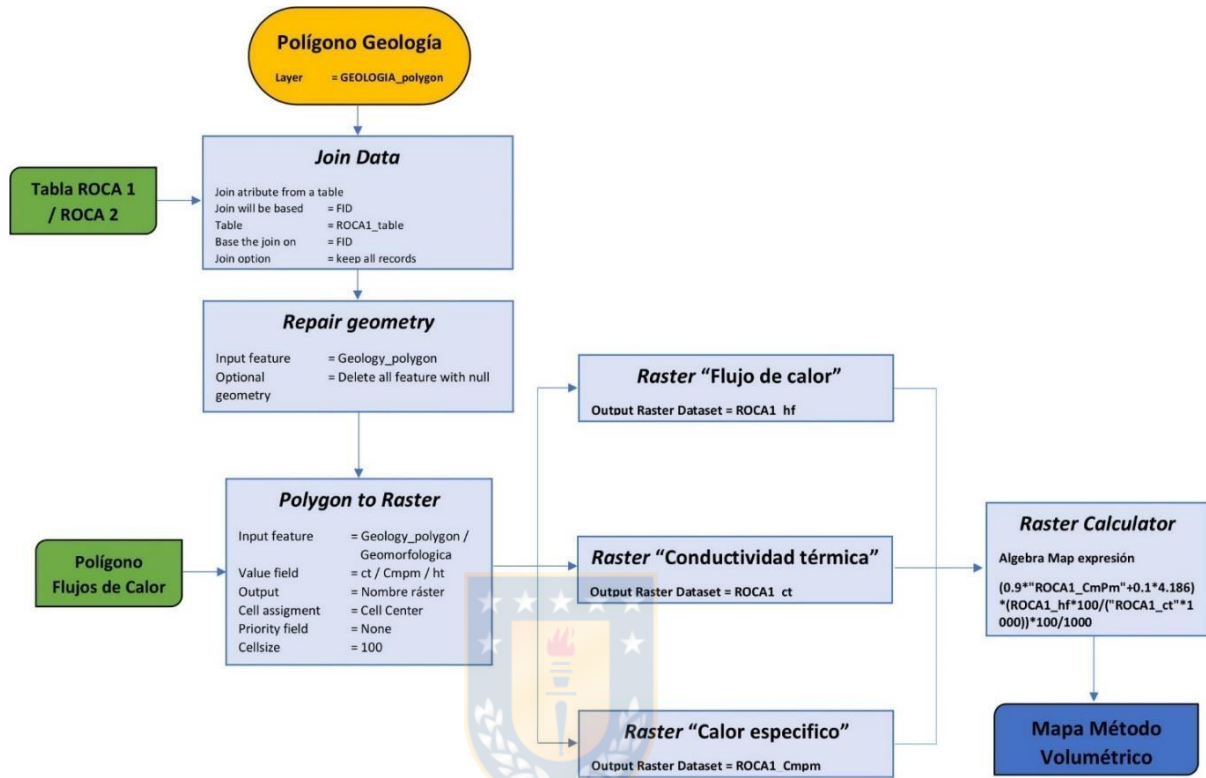


Figura 9.1 Procesamiento de la información Método Volumétrico <sup>3</sup>

<sup>3</sup> El esquema de procesamiento de la información Método Volumétrico, muestra para cada proceso (rectángulo celeste) en la parte superior el nombre de la herramienta de geoprocésamiento utilizada, mientras que en la parte inferior se detallan las opciones seleccionadas dentro de la misma. En este esquema el dato de entrada seleccionado en las opciones corresponde a la variable ROCA1 (ROCA1\_table) y por ende se determina el Método volumétrico para esta variable. Si se quiere determinar el Método volumétrico de la variable ROCA2 solo basta con sustituir el dato de entrada por (ROCA2\_table).

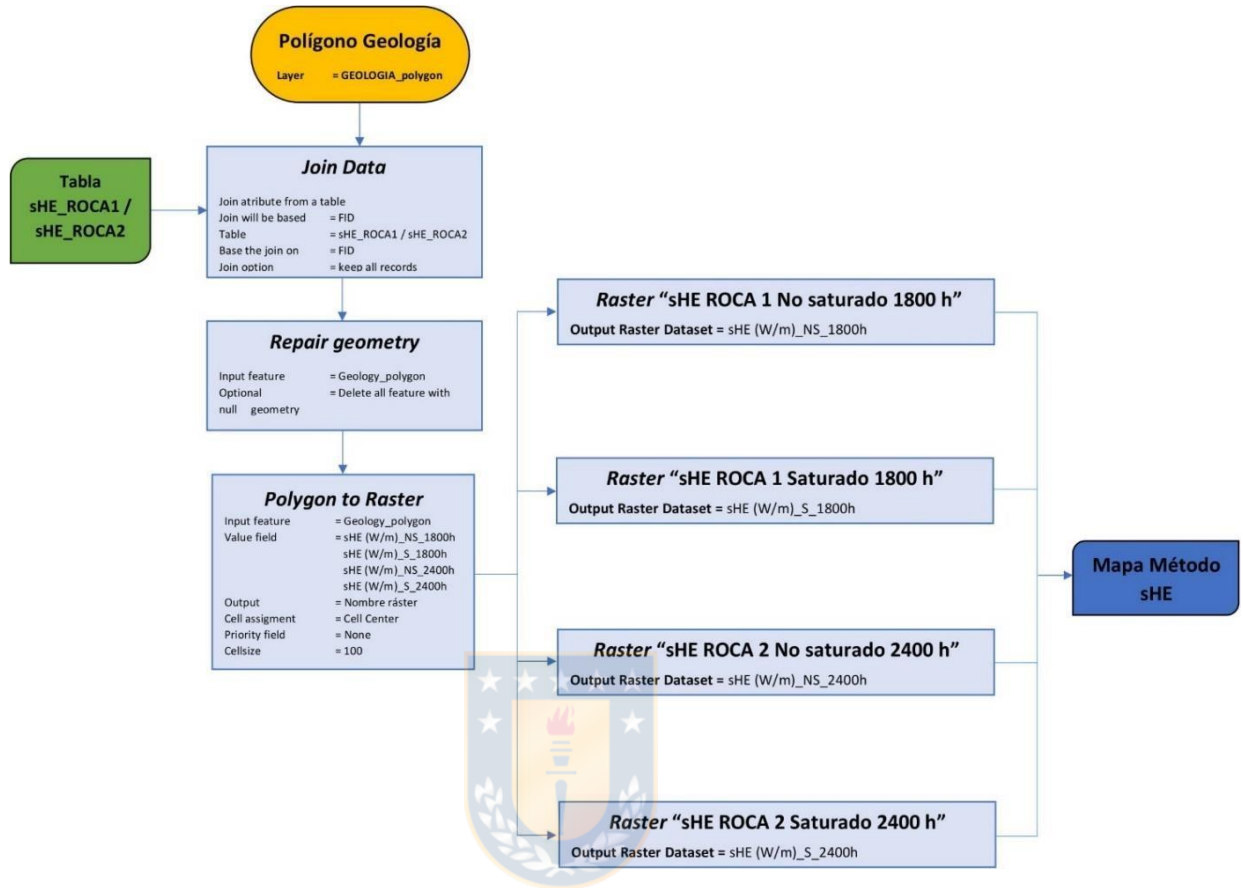


Figura 9.2 Procesamiento de la información Método sHE<sup>4</sup>

<sup>4</sup> El esquema de procesamiento de la información Método sHE, muestra para cada proceso (rectángulo celeste) en la parte superior el nombre de la herramienta de geoprocésamiento utilizada, mientras que en la parte inferior se detallan las opciones seleccionadas dentro de la misma. Los datos de salida del esquema corresponden a los ráster obtenidos para la variable ROCA1, a consecuencia de utilizar como dato de entrada la tabla "sHE\_ROCA1". Para determinar los ráster de la variable ROCA2, solo se debe sustituir el dato de entrada por la tabla "sHE\_ROCA2".



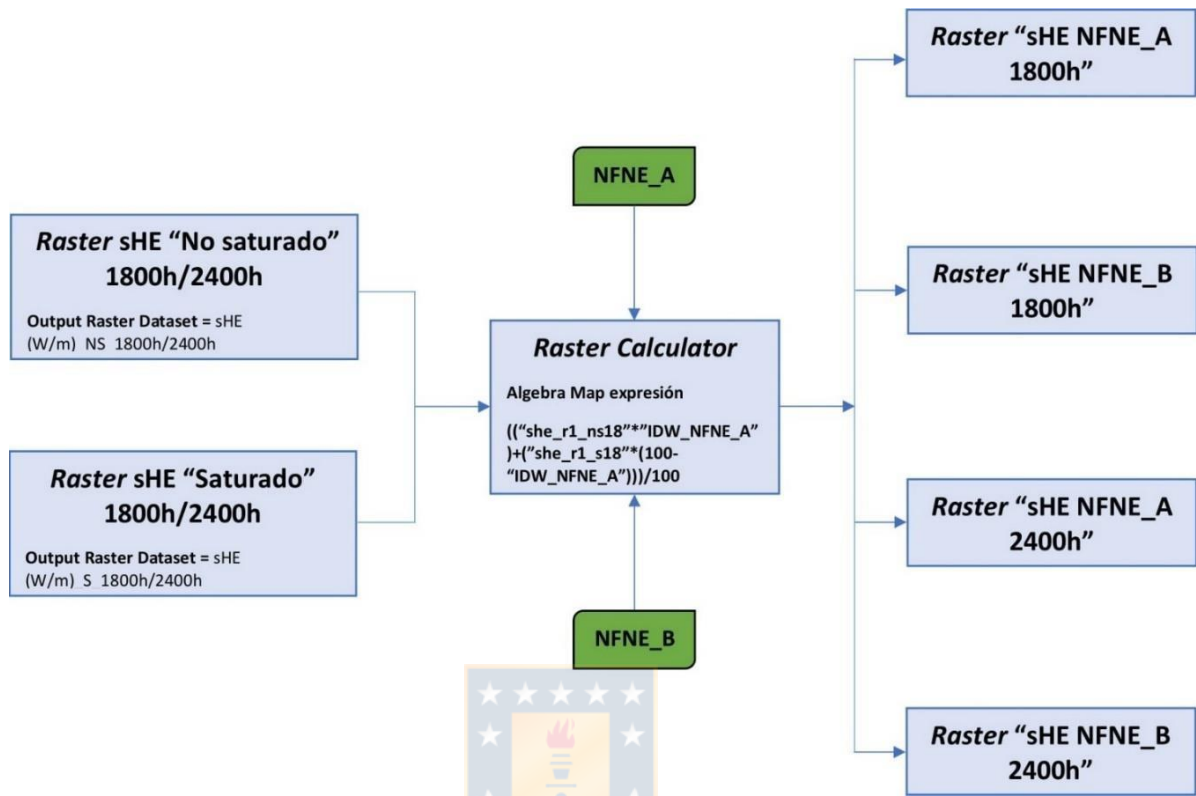


Figura 9.3 Procesamiento de la información Método sHE considerando diferentes escenarios de nivel freático<sup>5</sup>

<sup>5</sup> La expresión algebraica que se muestra en el proceso Raster Calculator, corresponde a la utilizada para determinar el ráster para la ROCA1 considerando un funcionamiento de 1800 horas y el "escenario A" dando como resultado el ráster "sHE NFNE\_A 1800h".

## 10 ANEXOS C: Parámetros

	Type of rock	Thermal conductivity $\lambda$ in W/(m·K)		Volume-related specific heat capacity $\rho \cdot c_p$ in MJ/(m <sup>3</sup> ·K)	Density $\rho$ in 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	
			recommended value			
Unconsolidated	clay/silt, dry	0,4–1,0	0,5	1,5–1,6	1,8–2,0	
	clay/silt, water-saturated	1,1–3,1	1,8	2,0–2,8	2,0–2,2	
	sand, dry	0,3–0,9	0,4	1,3–1,6	1,8–2,2	
	sand, moist	1,0–1,9	1,4	1,6–2,2	1,9–2,2	
	sand, water-saturated	2,0–3,0	2,4	2,2–2,8	1,9–2,3	
	gravel/stones, dry	0,4–0,9	0,4	1,3–1,6	1,8–2,2	
	gravel/stones, water-saturated	1,6–2,5	1,8	2,2–2,6	1,9–2,3	
	til/foam	1,1–2,9	2,4	1,5–2,5	1,8–2,3	
	peat, soft lignite	0,2–0,7	0,4	0,5–3,8	0,5–1,1	
Sedimentary rock	clay/silt stone	1,1–3,4	2,2	2,1–2,4	2,4–2,6	
	sandstone	1,9–4,6	2,8	1,8–2,6	2,2–2,7	
	conglomerate/breccia	1,3–5,1	2,3	1,8–2,6	2,2–2,7	
	marlstone	1,8–2,9	2,3	2,2–2,3	2,3–2,6	
	limestone	2,0–3,9	2,7	2,1–2,4	2,4–2,7	
	dolomitic rock	3,0–5,0	3,5	2,1–2,4	2,4–2,7	
	sulphate rock (anhydrite)	1,5–7,7	4,1	2,0	2,8–3,0	
	sulphate rock (gypsum)	1,3–2,8	1,6	2,0	2,2–2,4	
	chloride rock (rock salt, potash)	3,6–6,1	5,4	1,2	2,1–2,2	
	anthracite	0,3–0,6	0,4	1,3–1,8	1,3–1,6	
Magmatic rock	tuff	1,1	1,1			
	vulcanite, acid to intermediate	e.g. rhyolite, trachyte	3,1–3,4	3,3	2,1	2,6
		e.g. latite, dacite	2,0–2,9	2,6	2,9	2,9–3,0
	vulcanite, alkaline to ultra-alkaline	e.g. andesite, basalt	1,3–2,3	1,7	2,3–2,6	2,6–3,2
	plutonite, acid to intermediate	granite	2,1–4,1	3,2	2,1–3,0	2,4–3,0
		syenite	1,7–3,5	2,6	2,4	2,5–3,0
plutonite, alkaline to ultra-alkaline	diorite	2,0–2,9	2,5	2,9	2,9–3,0	
	gabbro	1,7–2,9	2,0	2,6	2,8–3,1	
Metamorphic rock	slightly metamorphic	clay shale	1,5–2,6	2,1	2,2–2,5	2,4–2,7
		chert	4,5–5,0	4,5	2,2	2,5–2,7
	moderately to highly metamorphic	marble	2,1–3,1	2,5	2,0	2,5–2,8
		quartzite	5,0–6,0	5,5	2,1	2,5–2,7
		mica schist	1,5–3,1	2,2	2,2–2,4	2,4–2,7
		gneiss	1,9–4,0	2,9	1,8–2,4	2,4–2,7
amphibolite	2,1–3,6	2,9	2,0–2,3	2,6–2,9		
Other materials	bentonite	0,5–0,8	0,6	~3,9		
	concrete	0,9–2,0	1,6	~1,8	~2,0	
	ice (-10 °C)	2,32		1,87	0,919	
	synthetics (HD-PE)	0,42		1,8	0,96	
	air (0 °C to 20 °C)	0,02		0,0012	0,0012	
	steel	60		3,12	7,8	
	water (+10 °C)	0,59		4,15	0,999	

Figura 10.1 Ejemplos de conductividad y capacidad térmica específica de subsuelos. Fuente

[6]

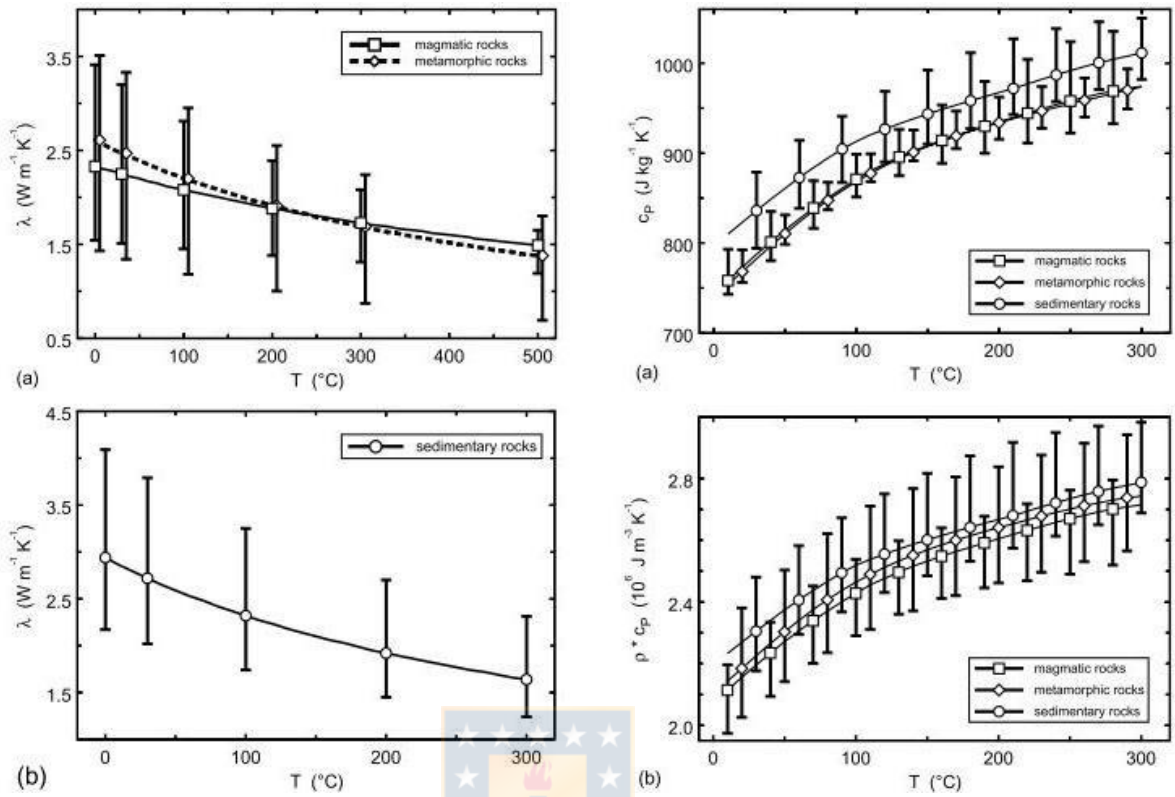


Figura 10.2. Principales valores y rango de variación de conductividad térmica, calor específico y calor específico volumétrico para roca magmática, metamórfica y sedimentaria.

Fuente [63]

### 11 ANEXO D: MAPAS

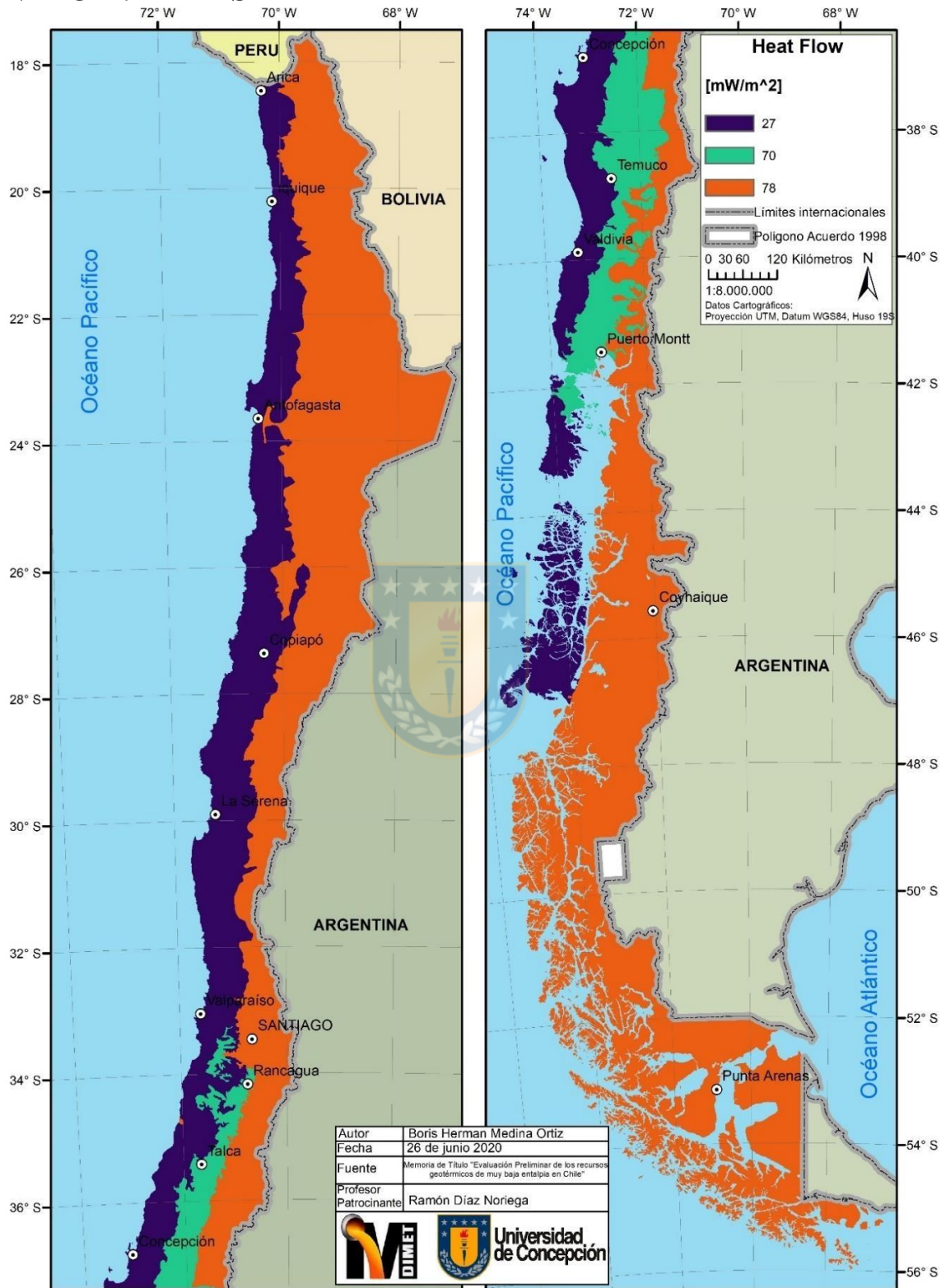


Figura 10.1 Mapa flujo de calor



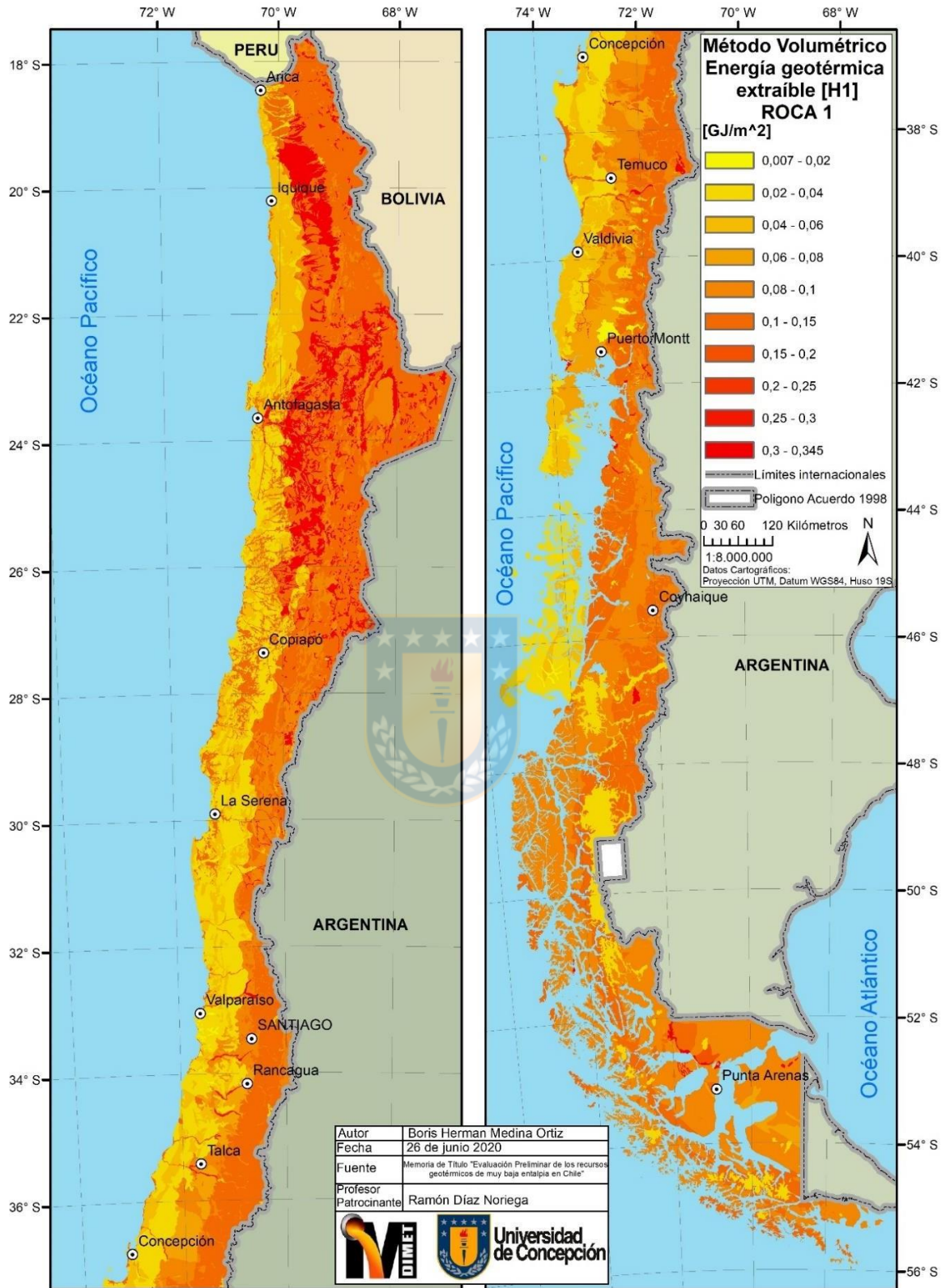


Figura 11.2 Mapa Método volumétrico, energía geotérmica extraíble [H1] ROCA 1.

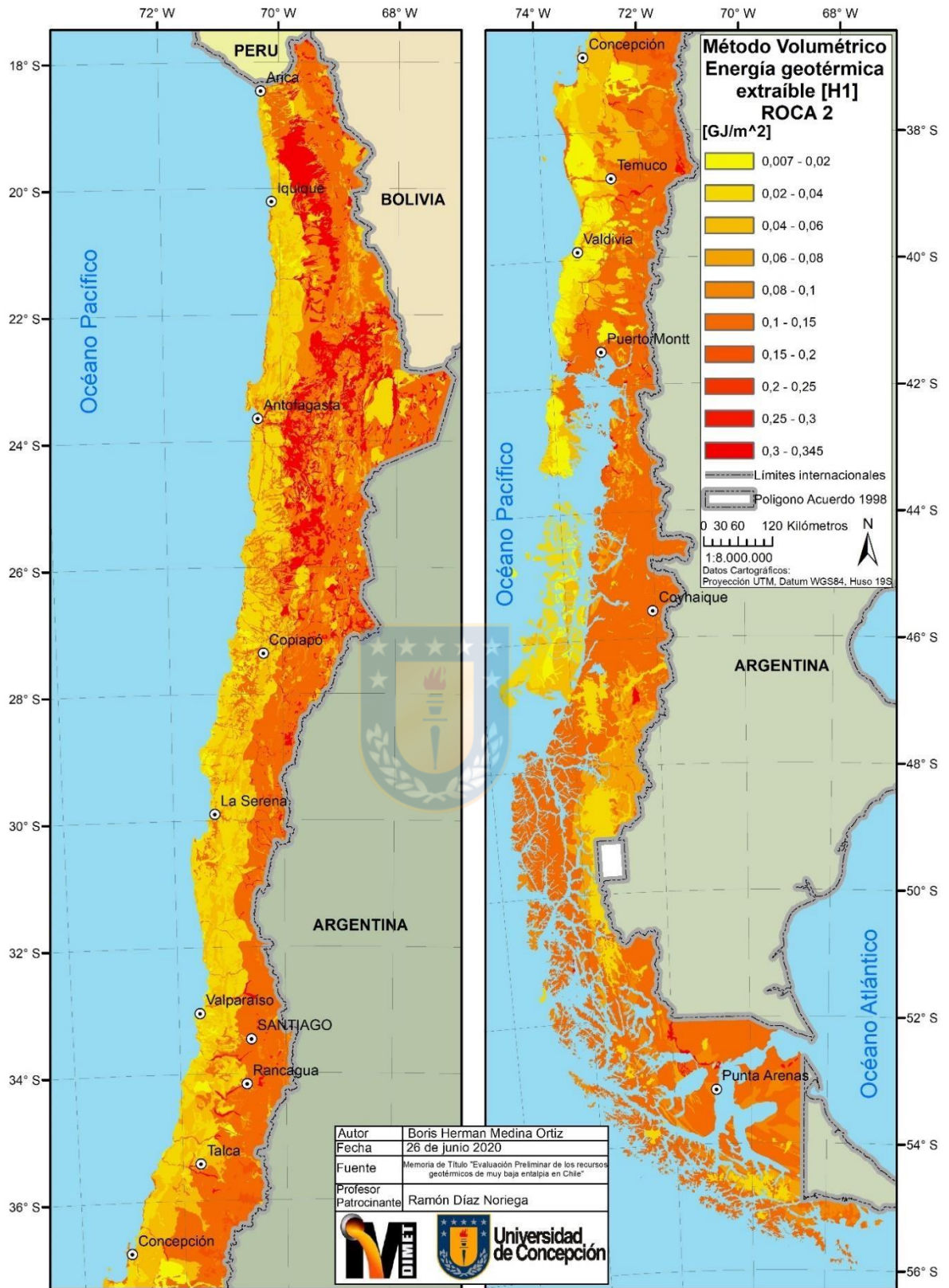


Figura 11.3 Mapa Método volumétrico, energía geotérmica extraíble [H1] ROCA 2.



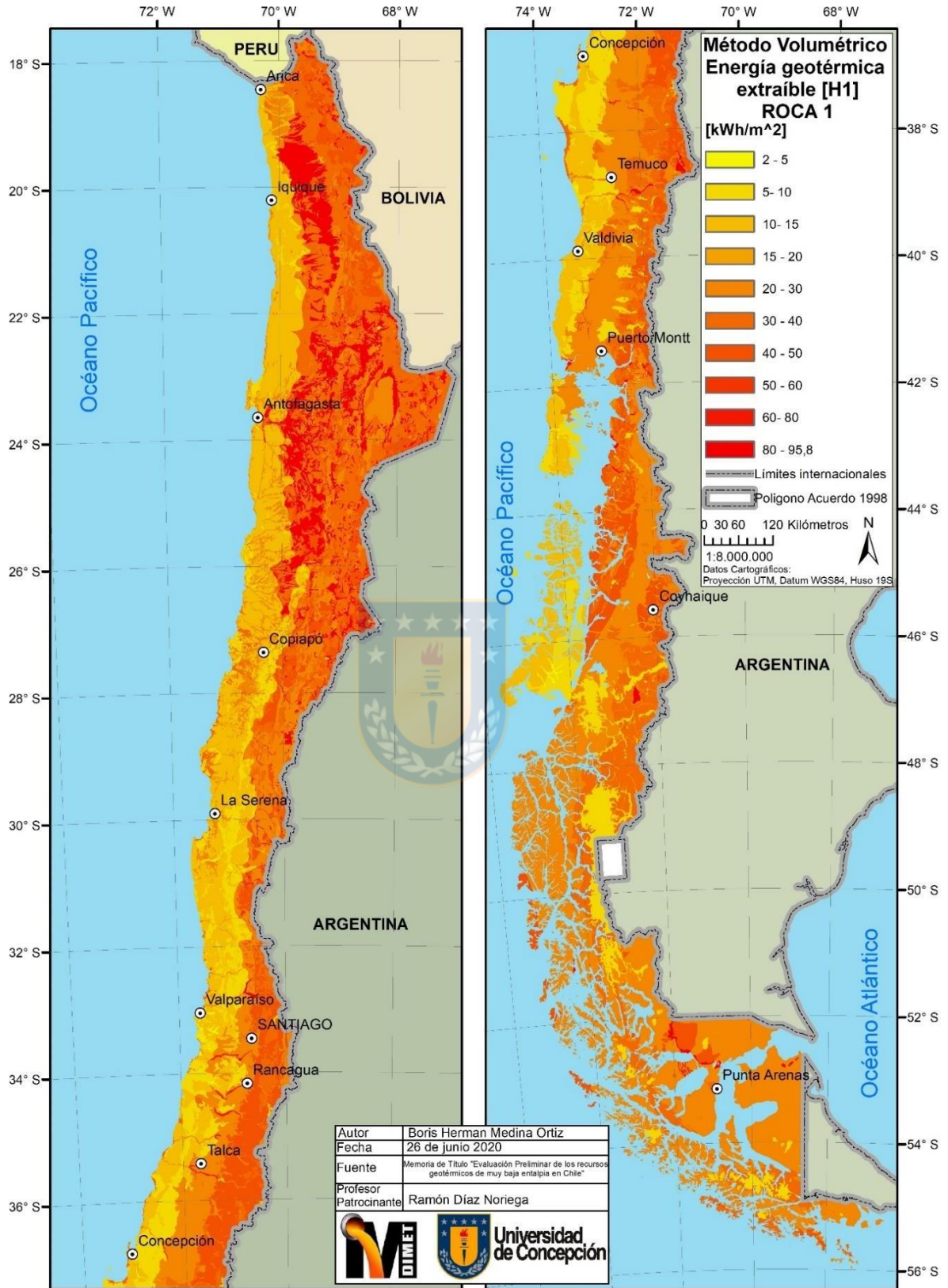


Figura 11.4 Mapa Método volumétrico, energía geotérmica extraíble [H<sub>1</sub>] ROCA 1.

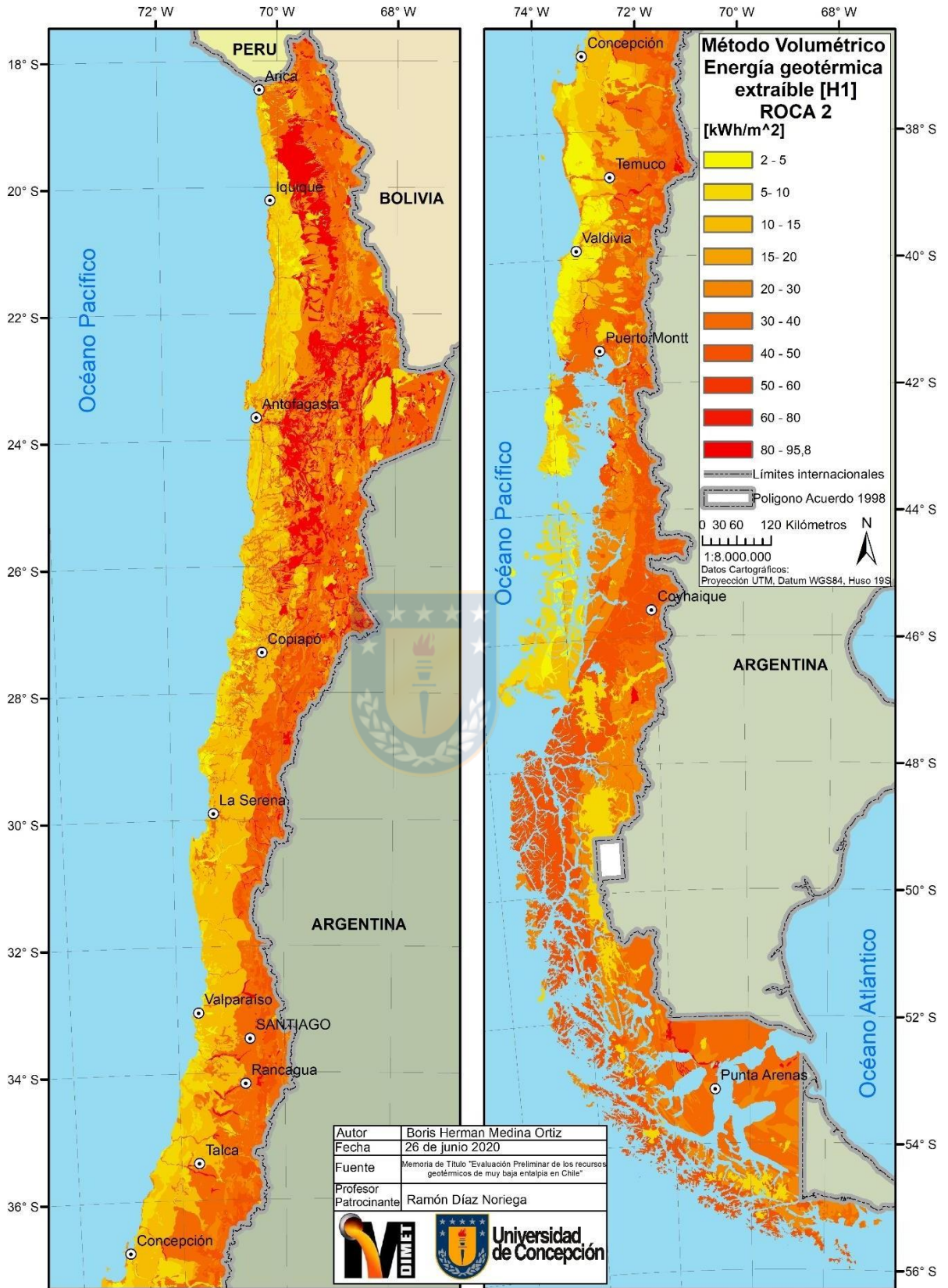


Figura 11.5 Mapa Método volumétrico, energía geotérmica extraíble [H<sub>1</sub>] ROCA 2.



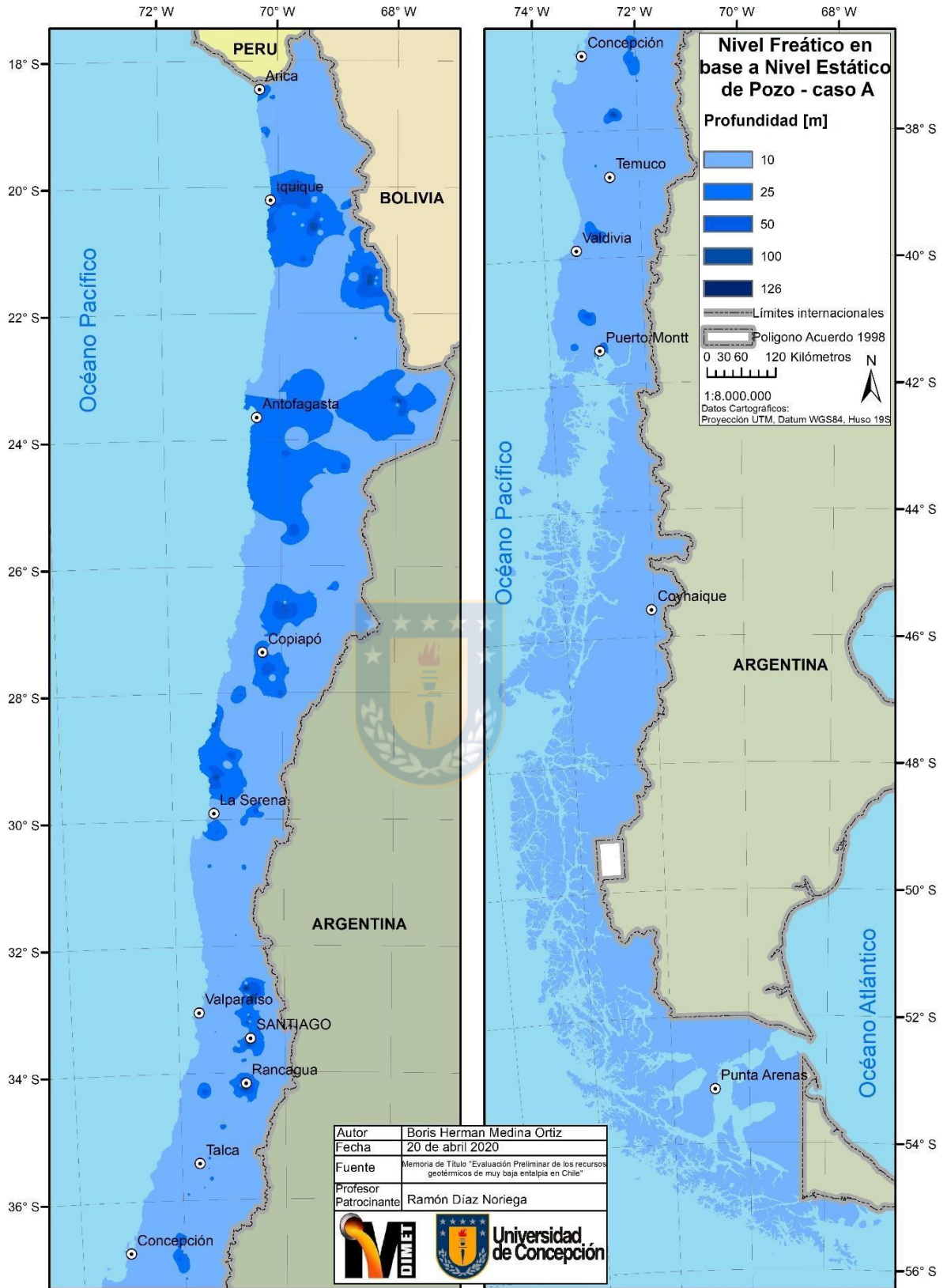


Figura 11.6 Mapa nivel freático escenario NFNE\_A

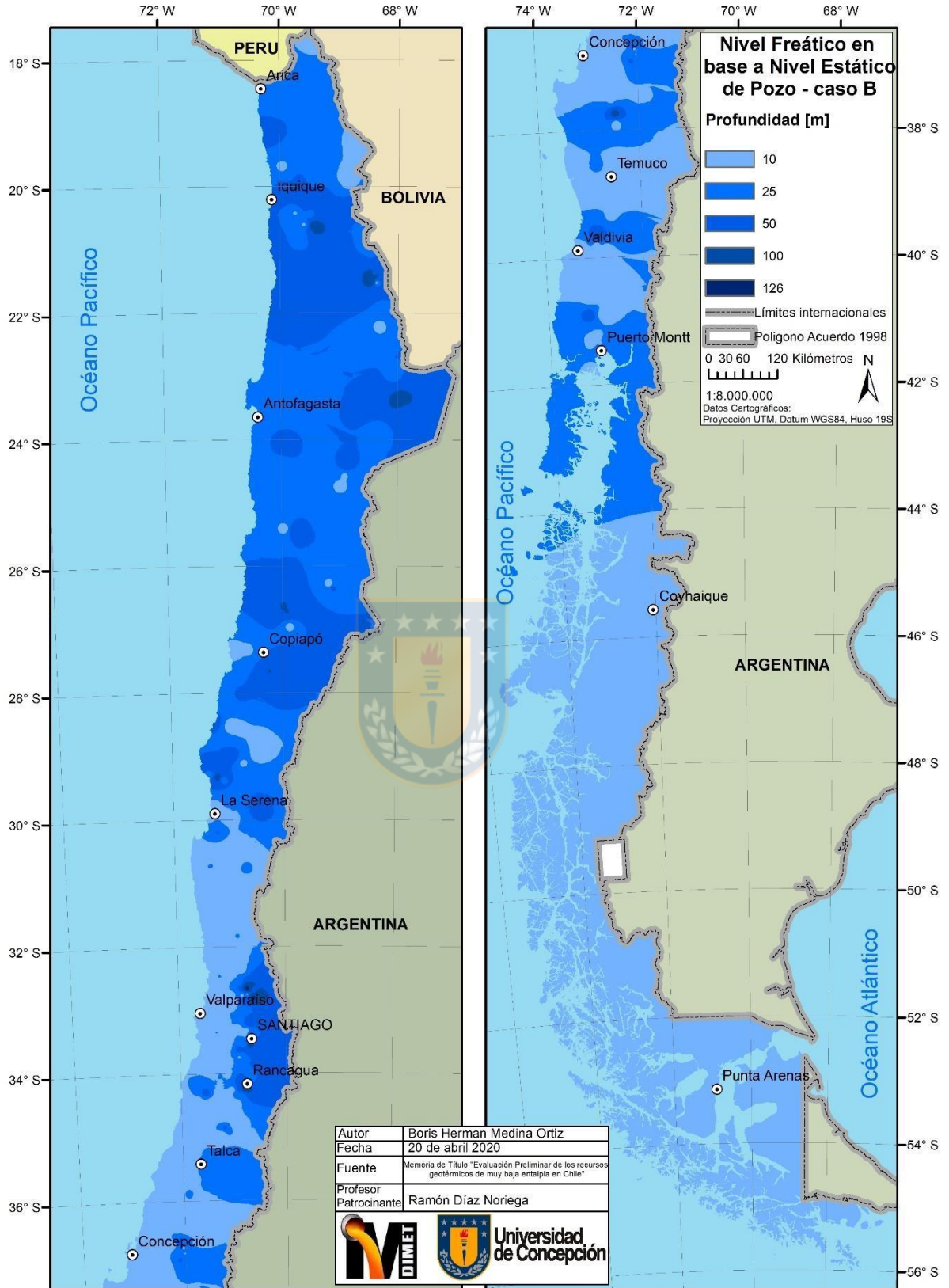


Figura 11.7 Mapa nivel freático escenario NFNE\_B

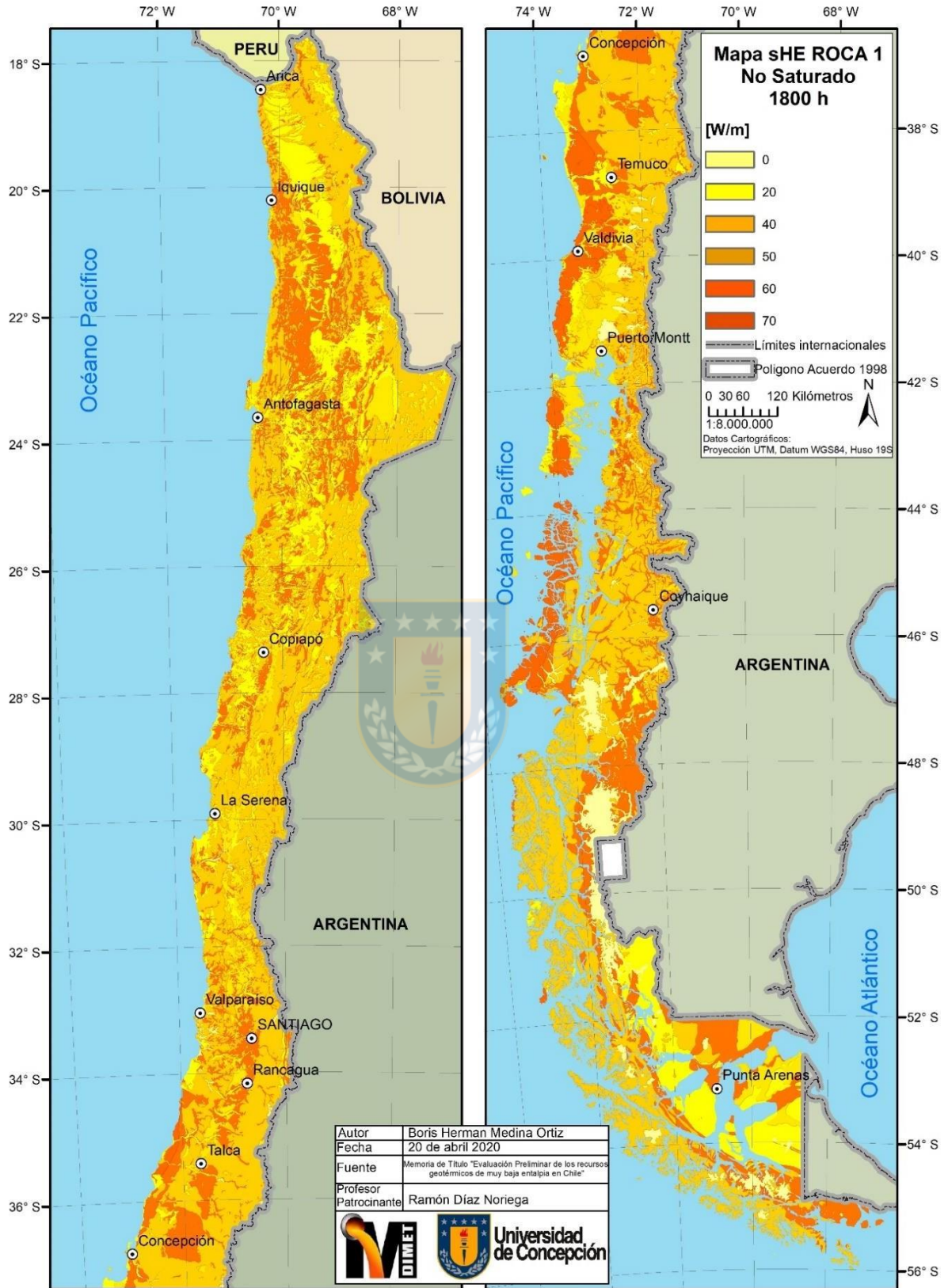


Figura 11.8 Mapa sHE ROCA 1, No saturado 1800 horas/año.



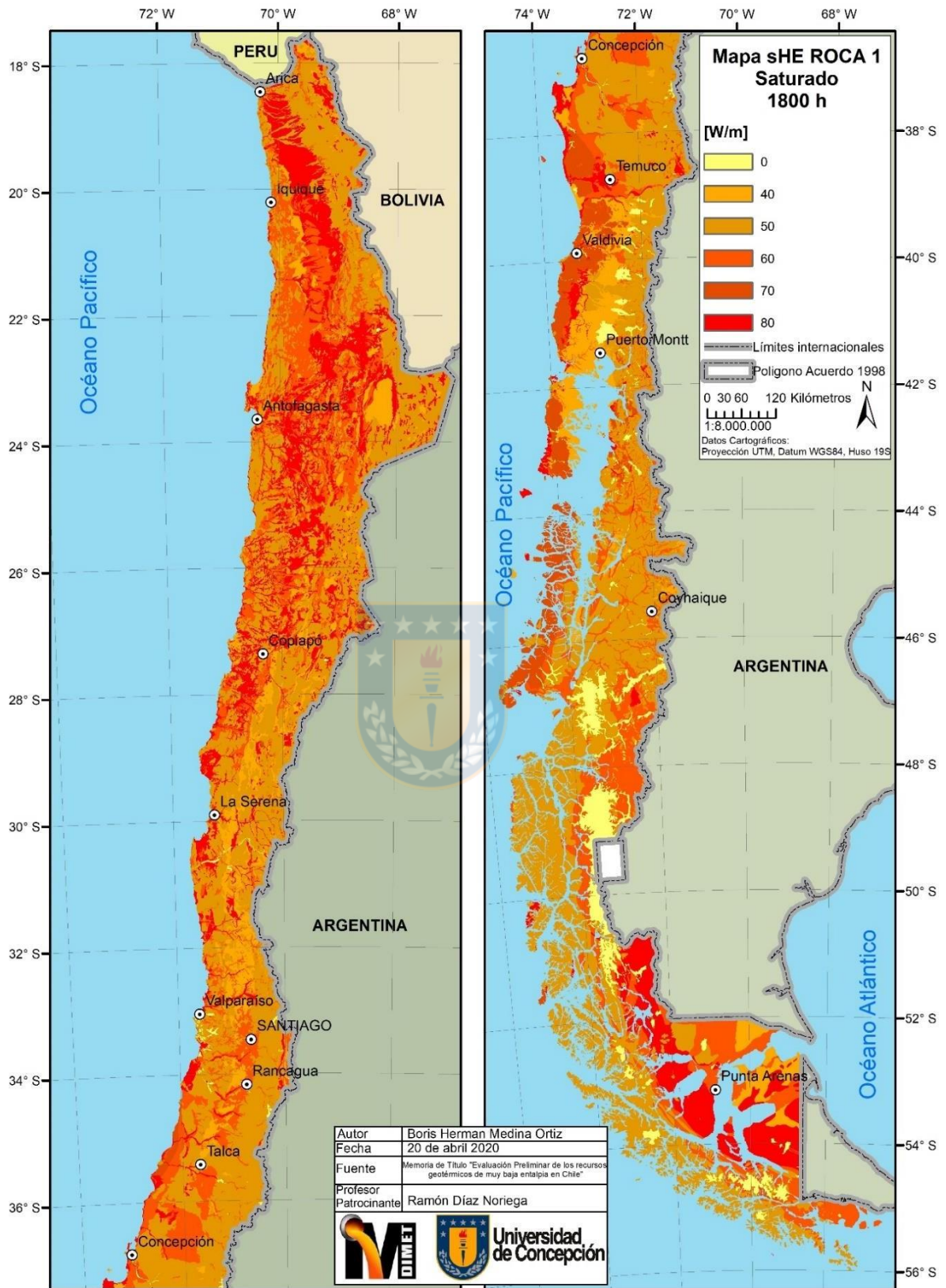


Figura 11.9 Mapa sHE ROCA 1, Saturado 1800 horas/año.

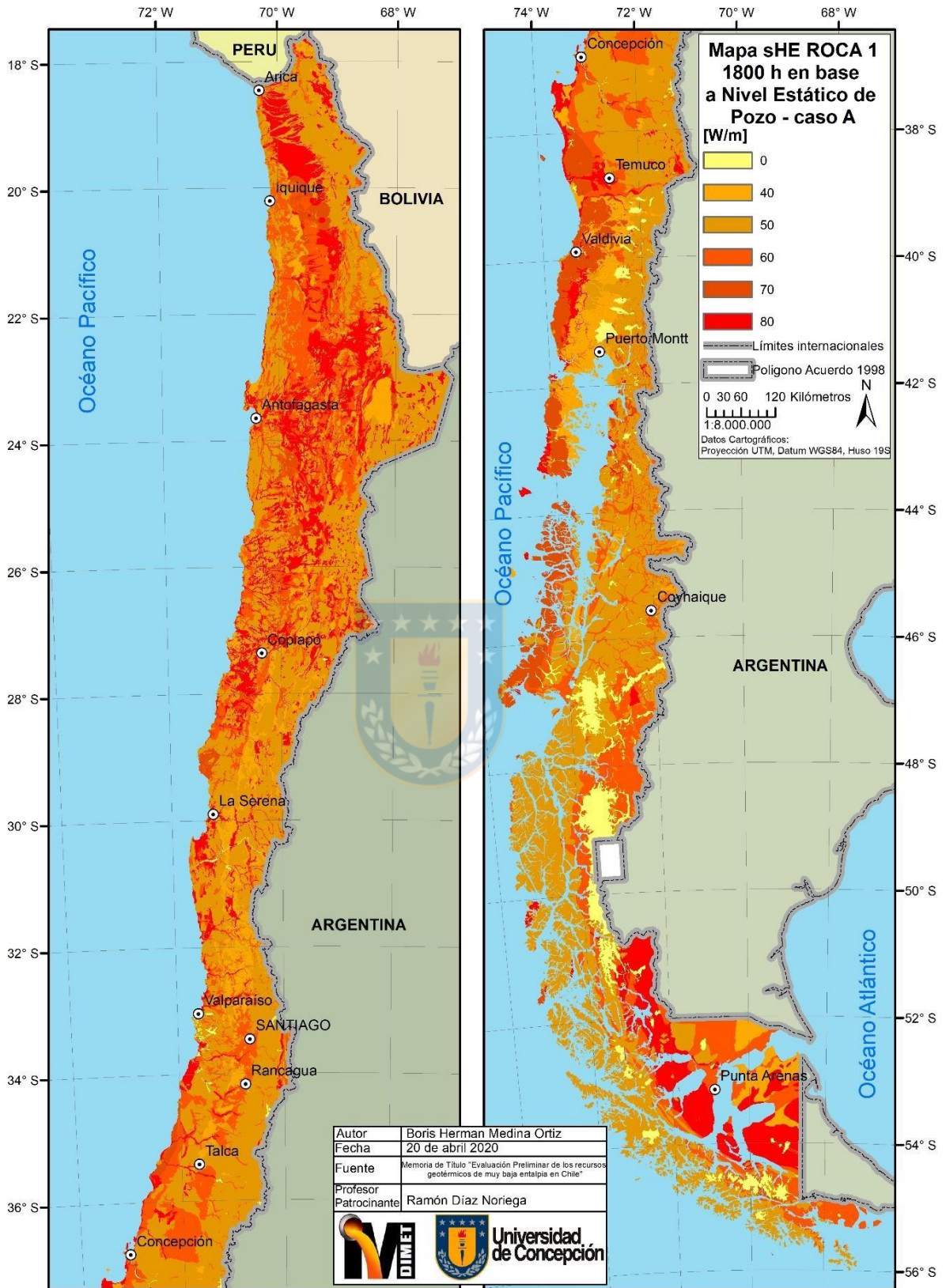


Figura 11.10 Mapa sHE ROCA 1, 1800 horas/año escenario NFNE\_A.



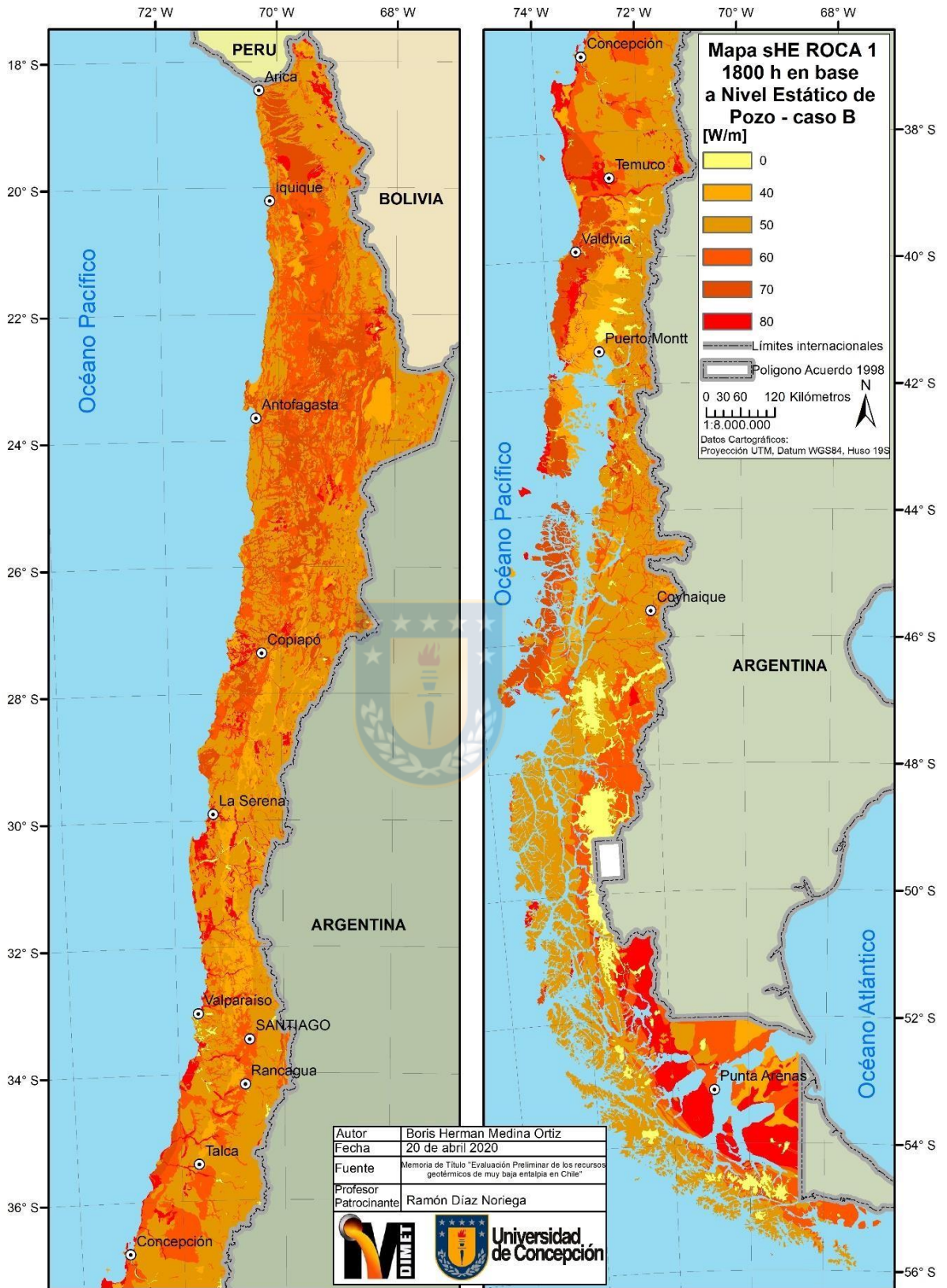


Figura 11.11 Mapa sHE ROCA 1, 1800 horas/año escenario NFNE\_B

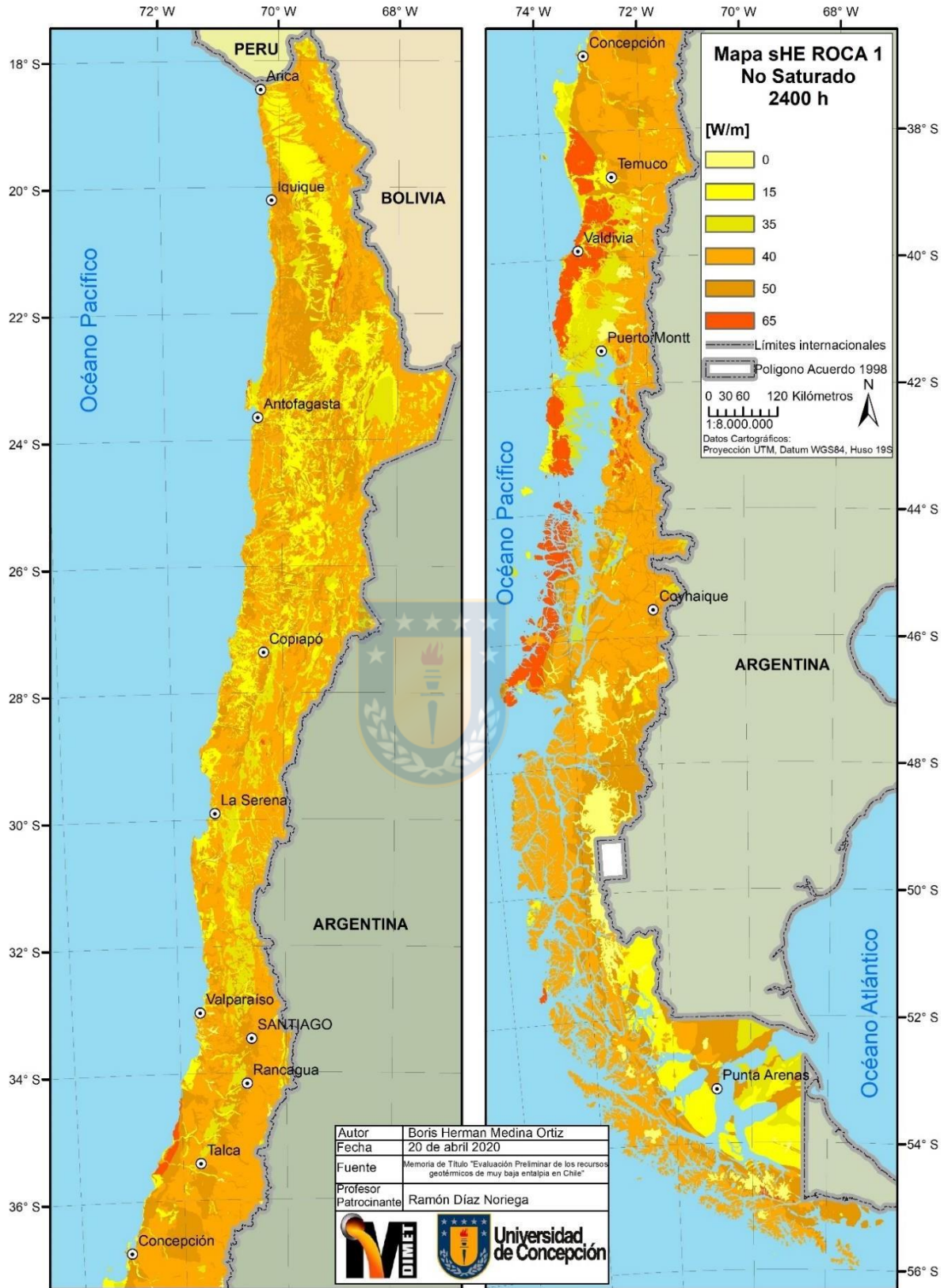


Figura 11.12 Mapa sHE ROCA 1, No saturado 2400 horas/año.



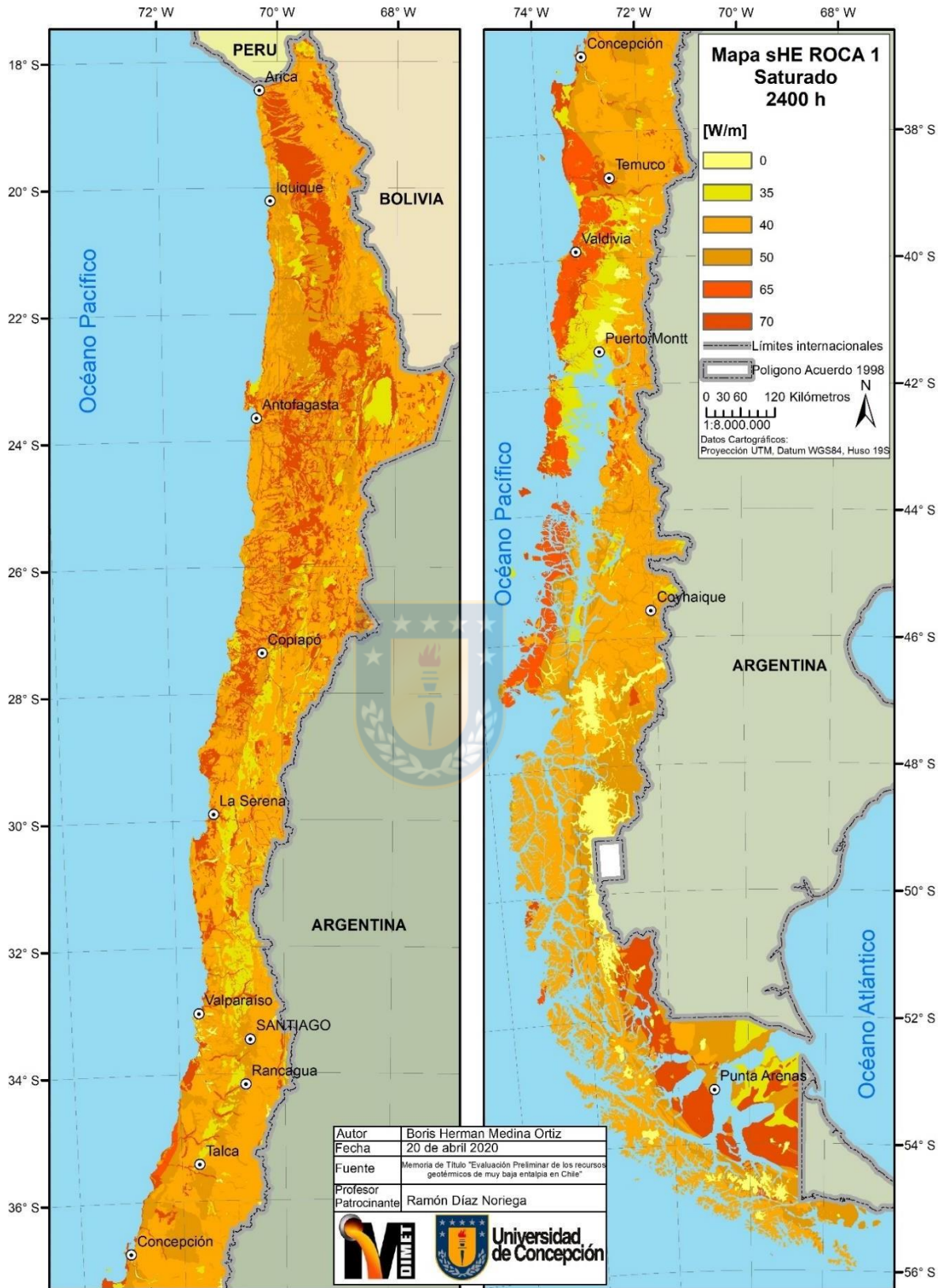


Figura 11.13 Mapa sHE ROCA 1, Saturado 2400 horas/año.



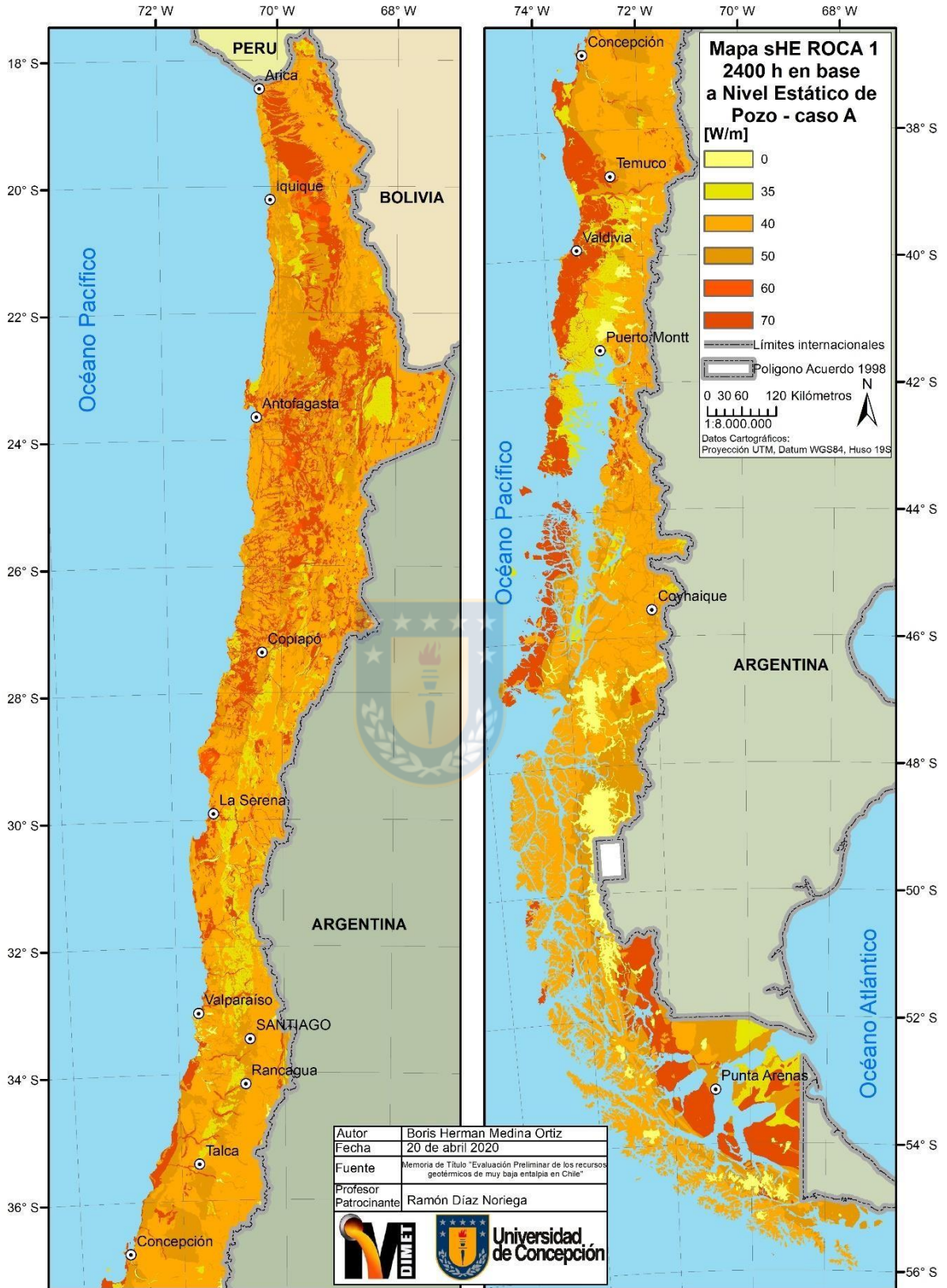


Figura 11.14 Mapa sHE ROCA 1, 2400 horas/año escenario NFNE\_A

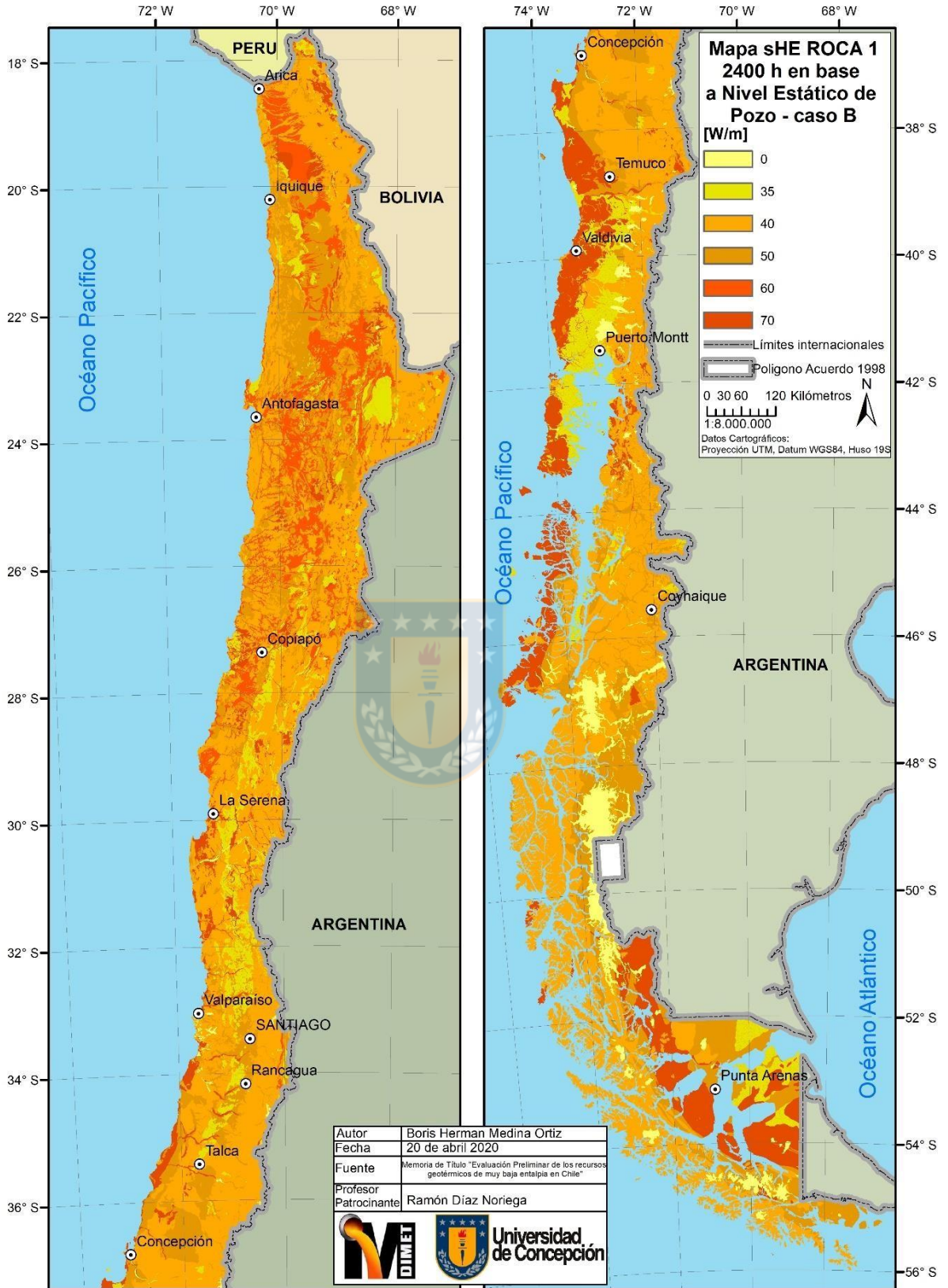


Figura 11.15 Mapa sHE ROCA 1, 2400 horas/año escenario NFNE\_B



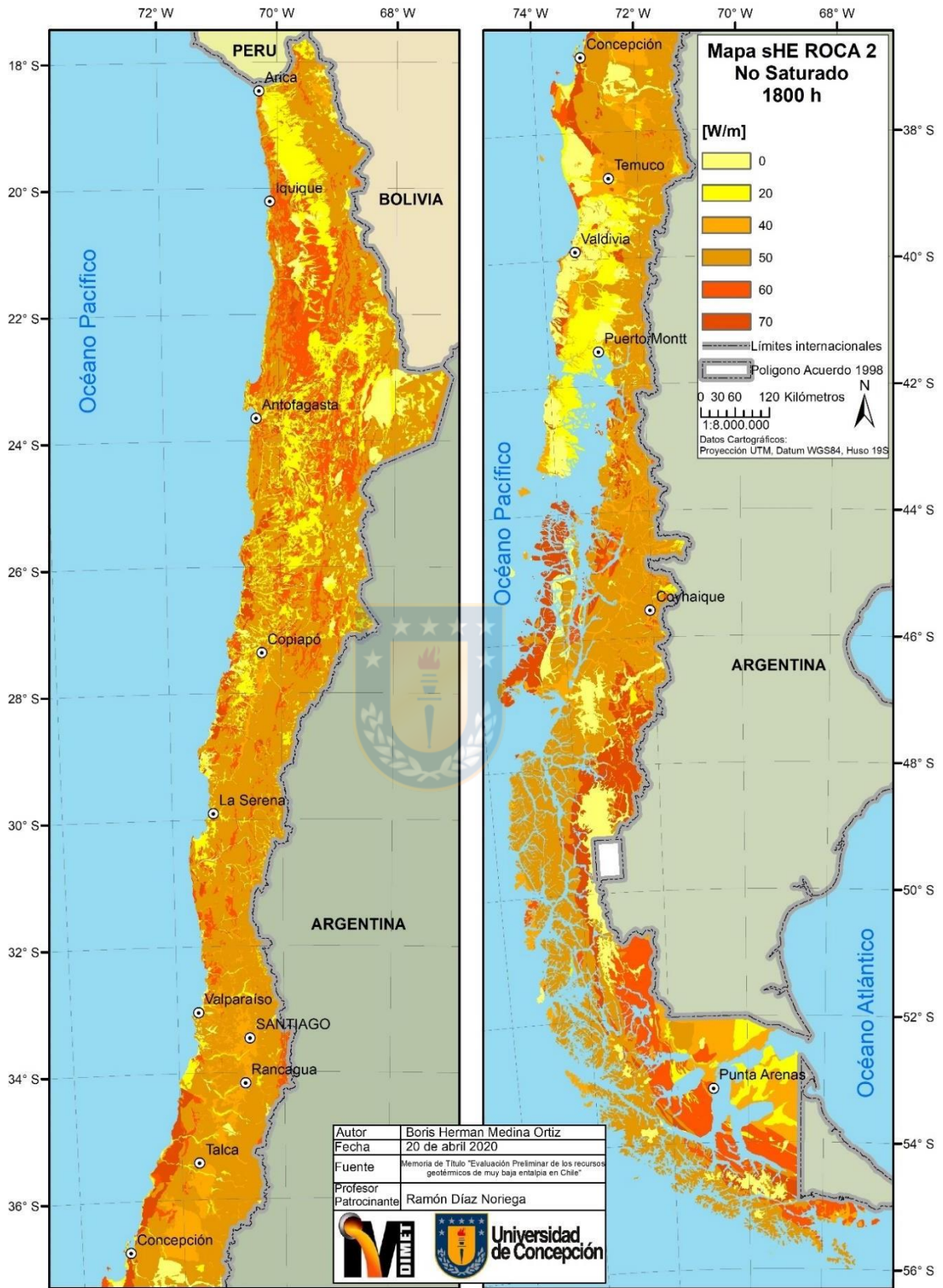


Figura 11.16 Mapa sHE ROCA 2, No saturado 1800 horas/año.

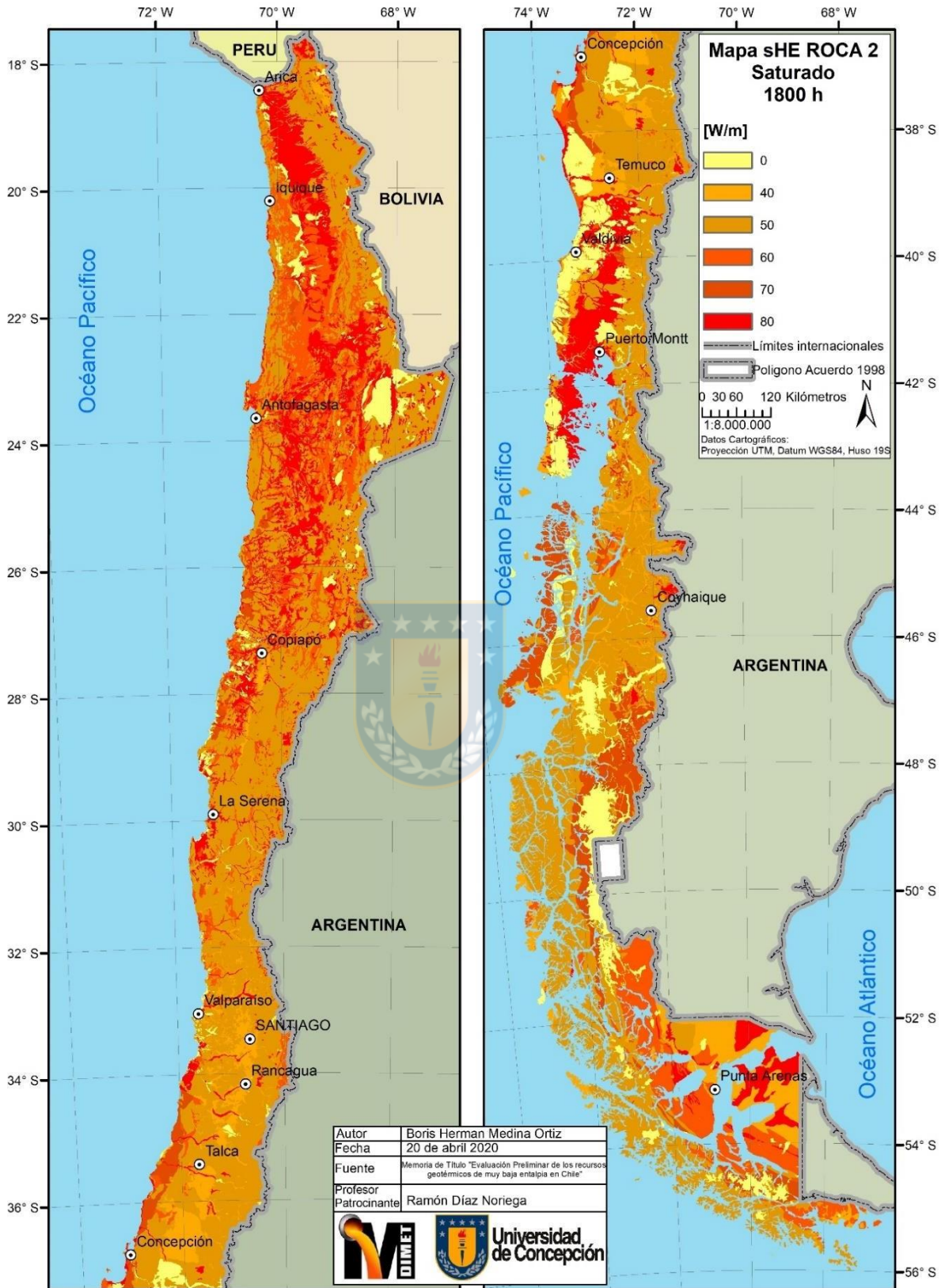


Figura 11.17 Mapa sHE ROCA 2, Saturado 1800 horas/año.



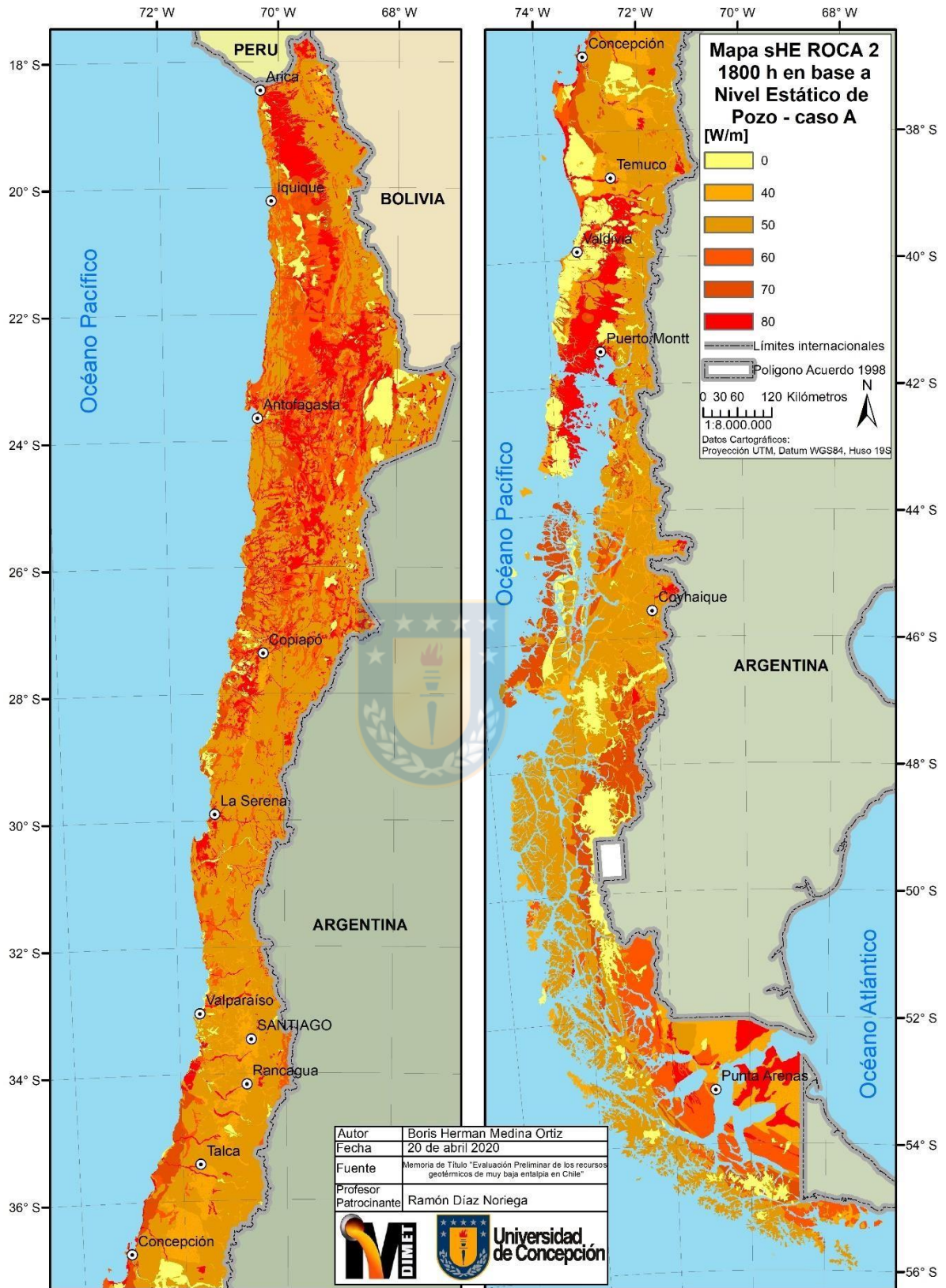


Figura 11.18 Mapa sHE ROCA 2, 1800 horas/año escenario NFNE\_A.

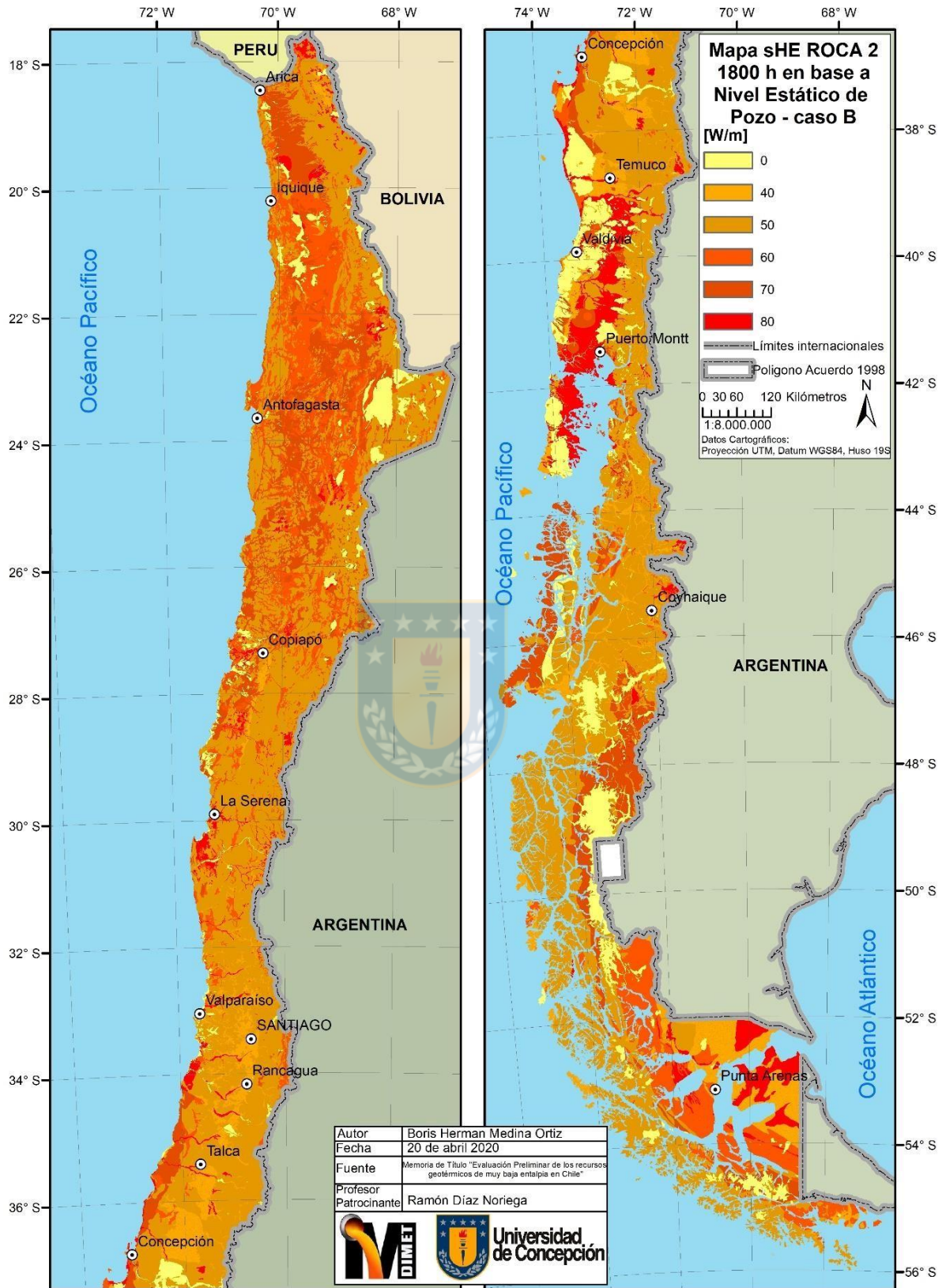


Figura 11.19 Mapa sHE ROCA 2, 1800 horas/año escenario NFNE\_B.



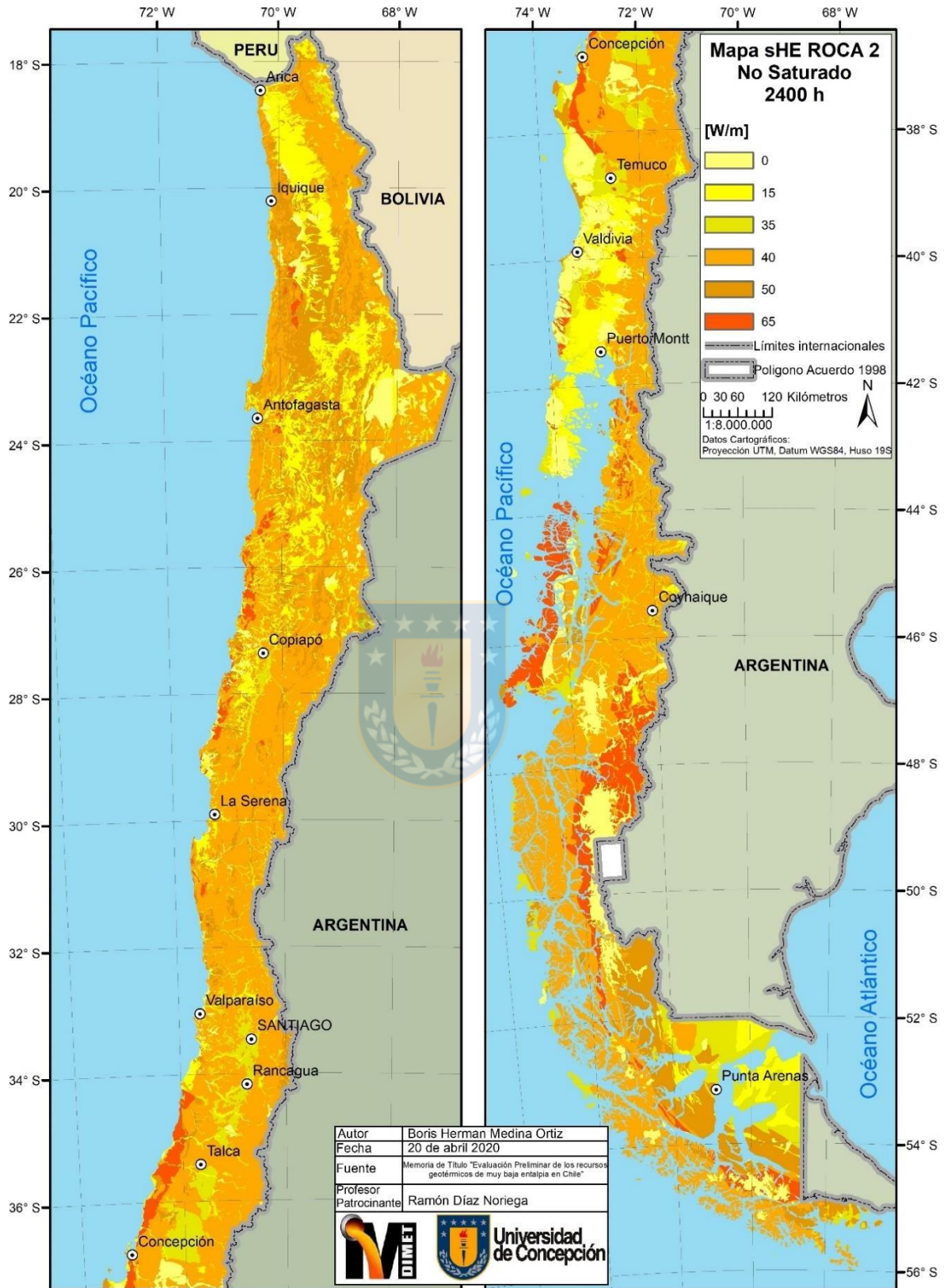


Figura 11.20 Mapa sHE ROCA 2, No saturado 2400 horas/año.

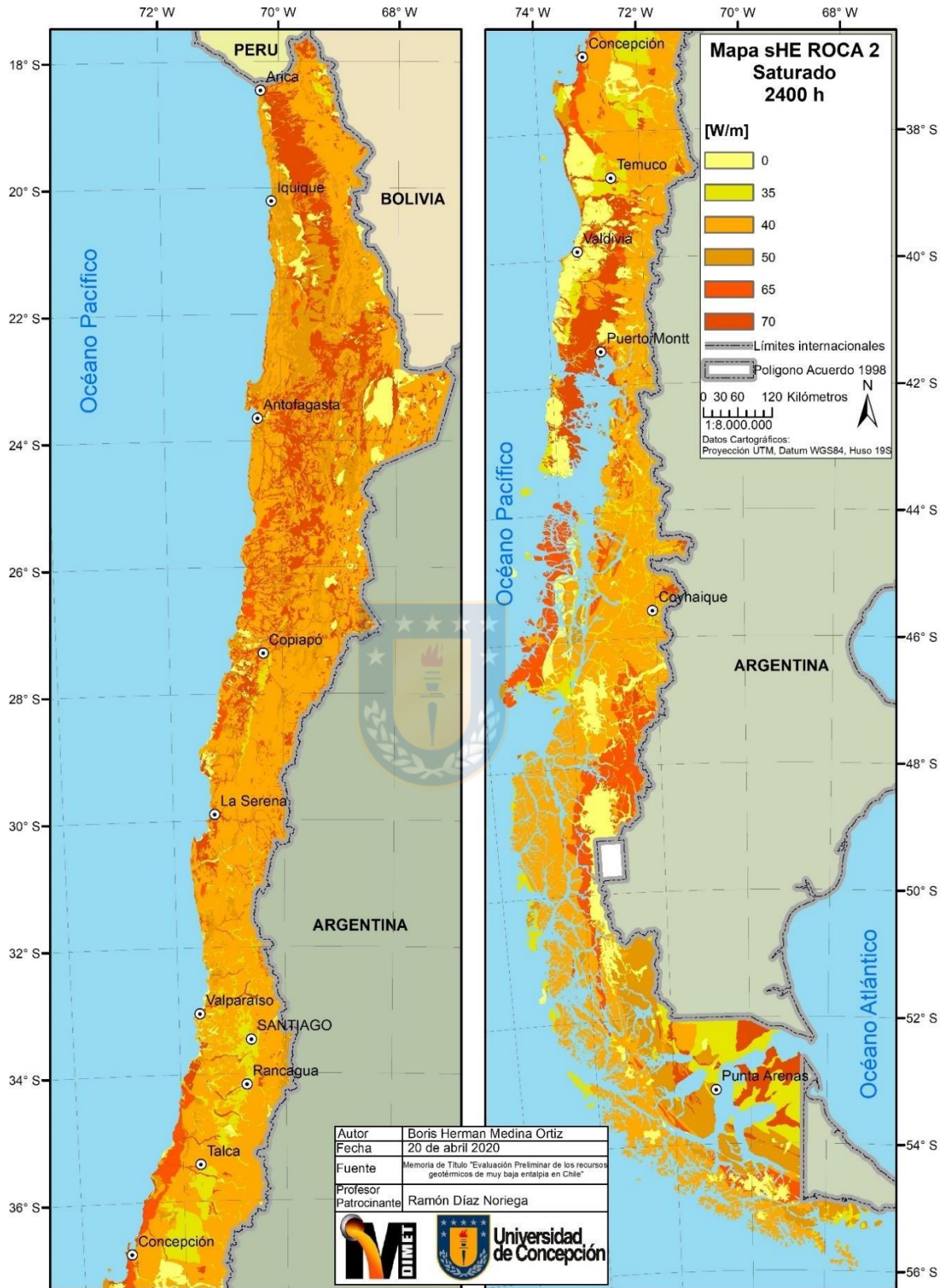


Figura 11.21 Mapa sHE ROCA 2, Saturado 2400 horas/año.



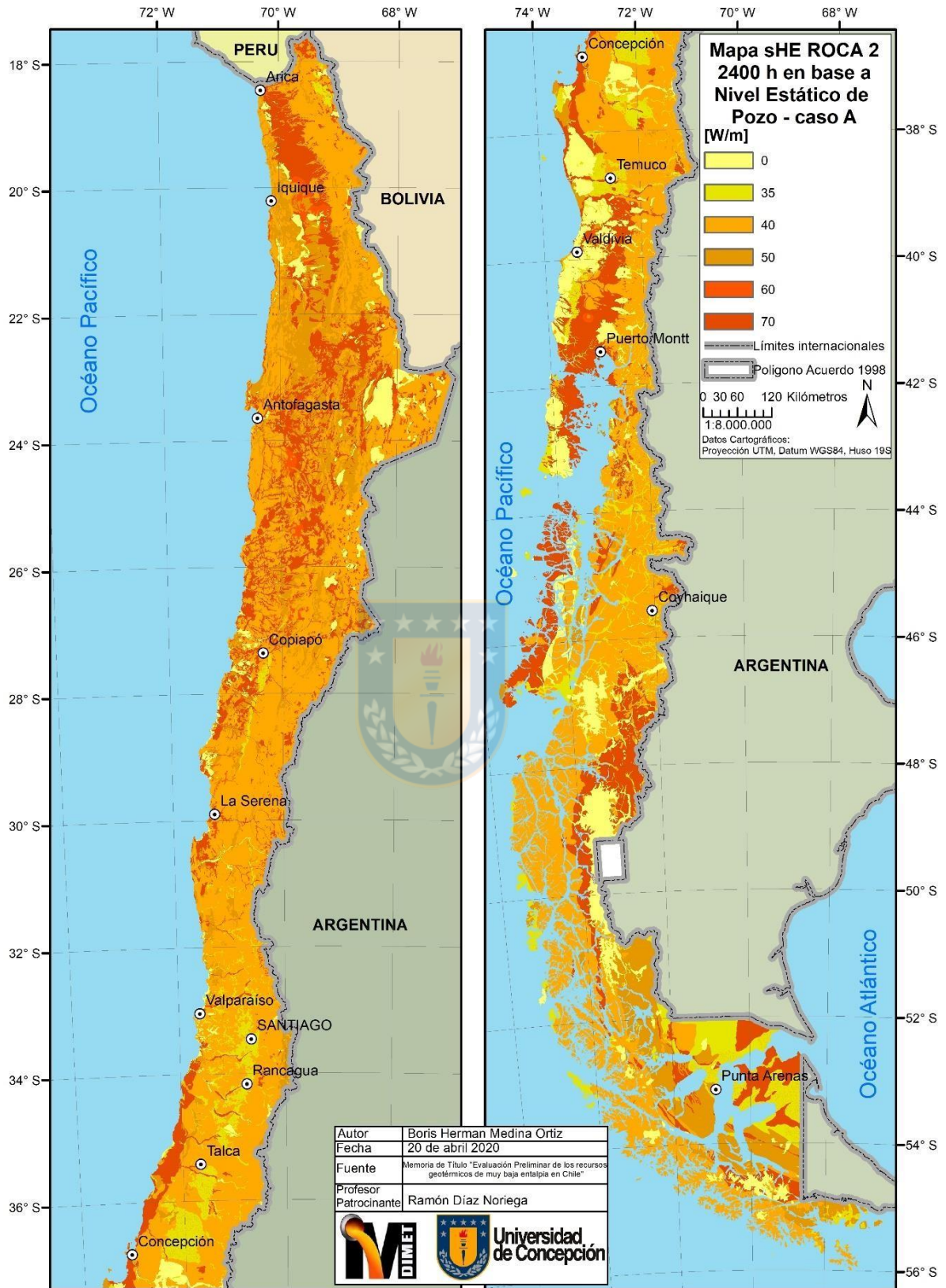


Figura 11.22 Mapa sHE ROCA 2, 2400 horas/año escenario NFNE\_A.

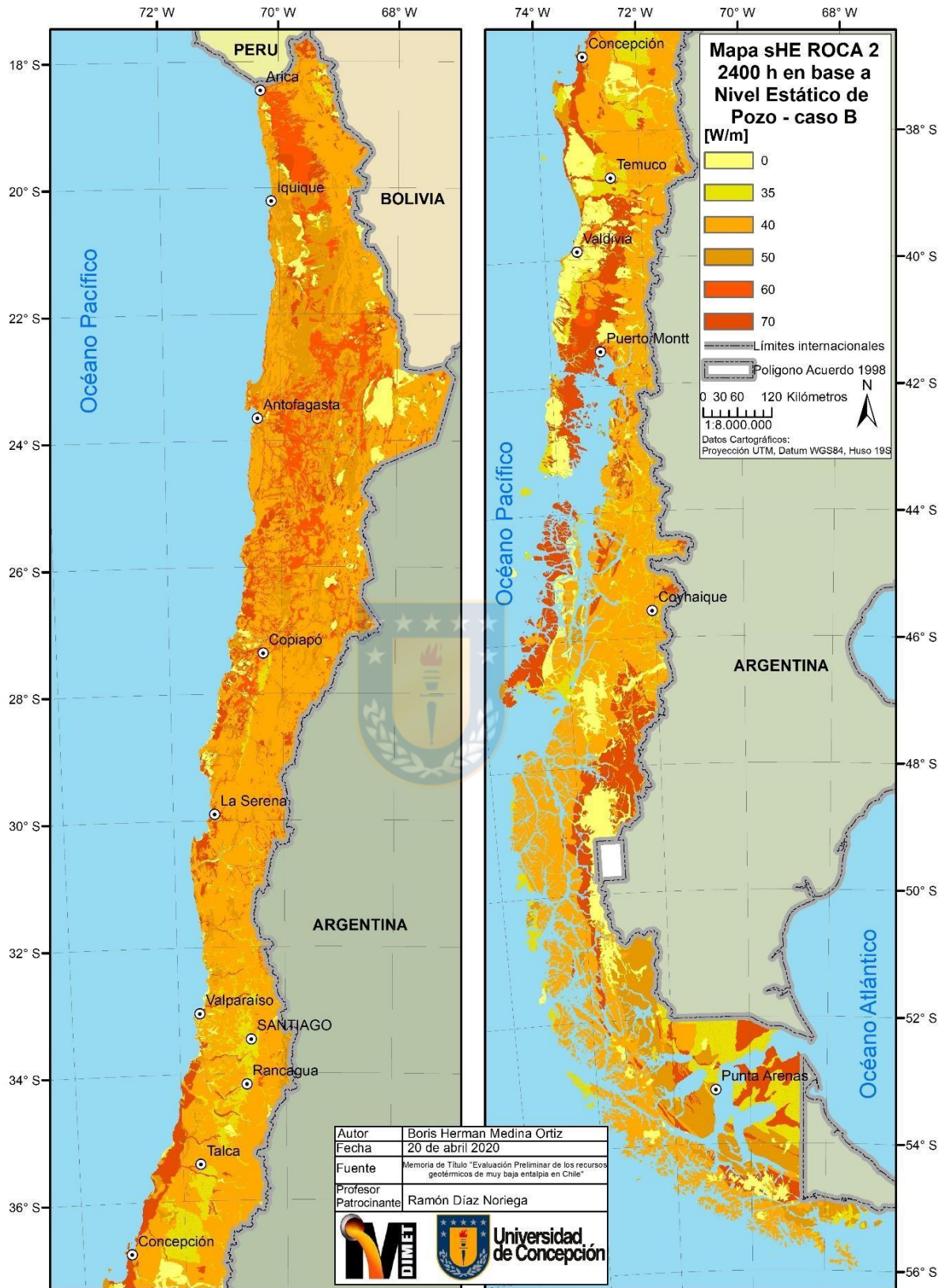

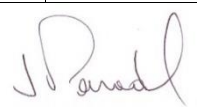




Figura 11.23 Mapa sHE ROCA 2, 2400 horas/año escenario NFNE\_B.

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

<b>Título: Evaluación preliminar de los recursos geotérmicos de muy baja entalpía en Chile</b>		
<b>Nombre Memorista: Boris Hernán Medina Ortíz</b>		
<b>Modalidad</b>	<b>Investigación</b>	<b>Profesor (es) Patrocinante (s)</b>
<b>Concepto</b>	Excelente	 <b>Prof. Ramón Díaz N.</b>
<b>Calificación</b>	6.9	
<b>Fecha</b>	30/9/2020	
 <b>Prof. Fernando Parada</b>		
		<b>Institución:</b>
<b>Comisión (Nombre y Firma)</b>		
 <b>Prof. Roberto Fustos T.</b>		 <b>Prof. Cristian Vera S.</b>
<b>Resumen</b>		
<p>La evaluación de recursos geotérmicos de muy baja entalpía es fundamental para promover el desarrollo, diseño y planificación de proyectos que hagan uso de estos recursos. Este estudio propone una serie de mapas preliminares con evaluaciones de los recursos geotérmicos de muy baja entalpía a escala país, desarrollados a partir de datos públicos disponibles en Chile.</p> <p>La evaluación se realiza mediante el uso de un sistema de información geográfica (GIS) y datos geológicos, hidrogeológicos y valores bibliográficos de parámetros térmicos asociados a las rocas identificadas.</p> <p>La revisión bibliográfica previa, permite determinar que los métodos más adecuados para el caso de estudio son el Método Volumétrico y el Método sHE (specific Heat Exchanger). A partir de los cuales, se elaboran varios mapas del territorio chileno continental con evaluaciones de los recursos geotérmicos de muy baja entalpía.</p> <p>Los resultados obtenidos, con el Método Volumétrico, permiten confeccionar 4 mapas con escenarios diferentes que representan el potencial de energía geotérmica de muy baja entalpía extraíble [H1] para una profundidad de 100 metros. Los valores obtenidos con este método se encuentran en un rango entre los 0,007 GJ/m<sup>2</sup> y los 0,345 GJ/m<sup>2</sup>, con un valor promedio de 0,104 GJ/m<sup>2</sup>. El potencial total en el territorio continental de Chile se estima entre los 76,81 EJ y los 79,71 EJ.</p> <p>Los resultados obtenidos, con el Método sHE, corresponden a 8 mapas que representan potencial de energía geotérmica de muy baja entalpía estimado en función de los valores de captación de calor específicos tabulados en la norma alemana VDI4640. Los mapas obtenidos consideran dos escenarios principales, condición “No saturado” y “Saturado” y dos rangos de funcionamiento de la bomba de calor para 1800 h/año y 2400 h/año. Los 4 escenarios adicionales se plantearon en función de los datos de pozos disponibles con mediciones de nivel freático, determinando que puede darse hasta un aumento del 14% en el valor promedio de potencial obtenido considerando el efecto del nivel del agua subterránea con respecto a la condición “No saturado” y pone de manifiesto la importancia de los datos hidrogeológicos.</p>		