

Geotermia en Chile: un siglo de historia para un desarrollo sustentable

Cecilia Ibarra, Sofía Vargas Payera, Diego Morata
Editores



Cecilia Ibarra es doctora en Política Científica y Tecnológica por la Universidad de Sussex, Reino Unido, investigadora del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) e investigadora adjunta del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. Su trabajo se enfoca en procesos de desarrollo tecnológico en Chile desde una perspectiva histórica.



Sofía Vargas Payera es investigadora social con formación en comunicación, investigadora doctoral en transdisciplina en la Escuela Politécnica Federal de Zúrich (ETH), Suiza, e investigadora social del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA). Su área de investigación es la interfaz ciencia, energía y sociedad, comunicación de riesgos y cultura científica.



Diego Morata es geólogo y doctor en Ciencias Geológicas de la Universidad de Granada, España, profesor titular del Departamento de Geología de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile y director del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA). Sus áreas de investigación son petrología, geoquímica y estudio de los minerales de alteración en sistemas geotermiales.



Geotermia en Chile:
un siglo de historia
para un desarrollo sustentable

Cecilia Ibarra, Sofía Vargas Payera, Diego Morata
Editores



FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE

Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA)
Proyecto ANID - FONDAP 15090013, ACE210005
www.cega-uchile.cl

Dirección y edición general: Cecilia Ibarra, Sofía Vargas Payera,
Diego Morata
Edición de textos: Cristina Espinoza Calderón
Diagramación: M. Giselle Ogaz
Ilustraciones: Ignacio Ortega

Primera edición, 2022
ISBN: 978-956-410-638-0

Impreso en Salesianos Impresores S.A.

ÍNDICE

- 1** Prólogo
Diego Morata
- 3** Introducción
Cecilia Ibarra, Sofía Vargas Payera y Diego Morata
- 11** Palabras del Ilustrador
Ignacio Ortega
- SECCION I: LA FUENTE**
- 13** Capítulo I
Paisajes geológicos: imagen, medida e imaginación en la formación del conocimiento geotermal
Martín Fonck, Catalina Valdés y María José Correa Gómez
- 36** Capítulo II
Exploración geotérmica en Chile: qué sabemos y cómo aprendimos del potencial geotérmico
Diego Aravena, Mauricio Muñoz Morales y Diego Morata.
- SECCION II: LA OPORTUNIDAD**
- 71** Capítulo III
Usos de la geotermia y sus aplicaciones en Chile: estabilidad energética y aire limpio
Mauricio Muñoz Morales, Nicolás Hurtado Arroyo y Esteban Micco
- 95** Capítulo IV
Cerro Pabellón, primera planta geotérmica de Sudamérica: el dulce despertar de un sueño y el inicio de una nueva era
Diego Morata
- 111** Capítulo V
Comunicación de la geotermia
Sofía Otero Cavada y Luz Fariña Rivas
- 125** Apéndice Capítulo V
Testigos geotérmicos
Philippe Robidoux

SECCION III: LA VOLUNTAD

- 132 **Capítulo VI**
Actores políticos y geotermia: el rol del Estado chileno y sus discursos
Miguel Saldivia y Cecilia Ibarra
- 157 **Capítulo VII**
Geotermia y sociedad: reflexiones a partir de intervenciones sociales
Sofía Vargas Payera
- 177 **Capítulo VIII**
Aysén, piloto geotérmico
Cecilia Ibarra, Sofía Vargas Payera, Diego Aravena, Mauricio Muñoz Morales y Juan Sáenz
- 206 **CONCLUSIONES**
Hay calor, hay talento y tecnologías para aprovecharlo, ¿falta acaso la voluntad?
Cecilia Ibarra, Sofía Vargas Payera y Diego Morata.
- 212 **Biografías de Autores**
- 217 **Referencias**

PRÓLOGO

Estimado lector, estimada lectora,

En este libro pretendemos recopilar esta intensa y apasionante década de investigación, desarrollo y formación de capacidades en geotermia desde la mirada del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), una iniciativa financiada por el Fondo de Financiamiento de Centros de Investigación en Áreas Prioritarias (FONDAP) de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID, ex CONICYT). Han sido once años de trabajo dedicado al estudio de los sistemas geotermiales andinos y de cómo éstos pueden aprovecharse de manera eficiente, sustentable y razonable, con miras a mejorar la calidad de vida de nuestros ciudadanos.

A lo largo de este libro podrá descubrir los diferentes aspectos que involucra el desarrollo de la geotermia, las dificultades y barreras que, hasta el día de hoy, existen para un avance masivo de esta fuente de energía inagotable que tenemos bajo nuestros pies y las oportunidades que nos brinda este recurso energético. Podrá conocer y analizar los avances que esta manera eficiente de utilizar el calor de la Tierra ha tenido en nuestro país. Se han dado pasos importantes en el uso de la geotermia en Chile pero, sin lugar a dudas, aún nos queda un largo recorrido. Un camino que se debe hacer entre todos: academia, sector público, privados y sociedad.

Hemos puesto nuestra mayor ilusión en poder realizar un libro ameno que permita entender lo que es la geotermia y lo que puede aportar esta fuente de energía a nuestro país. Confiamos en que disfrute de su lectura y que descubra, en sus páginas, esa maravilla que tenemos bajo nuestros pies. Somos un país afortunado en energías renovables, aprovechemos esta ventaja geográfica y geológica para construir juntos una sociedad más justa y con un mayor respeto al medio ambiente.

Diego Morata

INTRODUCCIÓN

Cecilia Ibarra, Sofía Vargas Payera y Diego Morata

Este libro fue escrito entre 2020 y 2021, tiempos marcados por la crisis sanitaria mundial del COVID-19. En este periodo complejo y adverso hemos decidido darnos un espacio para reflexionar sobre lo que fueron los diez primeros años del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) de la Universidad de Chile y escribir sobre geotermia.

Este centro de investigación FONDAF inició su andadura a finales del 2010 y fue parte de una década de cambios en el panorama de las energías renovables en el país. El CEGA, desde sus orígenes, busca mejorar y aumentar el conocimiento sobre la geotermia en el país. ¿Por qué? Primero, porque Chile tiene un potencial geotérmico ilimitado y el calor de la Tierra, en todos sus usos, presenta la ventaja de estabilidad en la frecuencia de la provisión energética. Esto quiere decir que la energía geotérmica no presenta cambios significativos durante el día ni durante el año, y no depende del clima, por lo que es estable, a diferencia de las otras energías renovables. Por otra parte, es una energía versátil porque puede ser usada para producir electricidad, pero también de manera directa para procesos térmicos como la climatización de ambientes, siendo ésta una gran oportunidad para disminuir la contaminación generada por el consumo de leña en ciudades del sur del país. Además, es una energía amigable con el medio ambiente y es renovable, si su uso es el adecuado.

Volviendo a los orígenes del CEGA, cuando se funda, Chile se proyectaba como la promesa para el desarrollo de la energía geotérmica, de la cual se hablaba en los congresos académicos mundiales desde hacía mucho tiempo, con la expectativa de que el país pronto fuera un ejemplo del aprovechamiento de esta energía, debido a sus favorables condiciones geológicas. Fueron varios los congresos en donde se indicaba el inmenso potencial geotérmico de los Andes, en general, y de Chile, en particular. Además, estos inicios del CEGA coincidieron con un contexto energético local marcado por una efervescencia por la exploración del potencial geotérmico de zonas volcánicas del norte, centro y sur del país para la generación de electricidad, y por una inestable provisión de electricidad en la capital, la cual incluso sufrió cortes de suministro en la década anterior.

El siglo XX terminó mostrando la fragilidad de la matriz energética de Chile. El gas proveniente de Argentina, a un precio realmente bajo, fue cortado de un día para otro; una pertinaz sequía en la zona central del país hizo tambalear nuestra capacidad de generación de electricidad, y expe-

rimentamos en carne propia lo que suponía el racionamiento de energía: cortes de electricidad programados de varias horas, situación que hoy parece impensable e inaceptable para una sociedad mucho más empoderada. Fue en ese contexto que el Estado facilitó la exploración geotérmica por parte de privados con la promulgación de la Ley 19.657 sobre Concesiones de Energía Geotérmica. Las expectativas eran altas, Chile podría llegar a ser la Arabia Saudita de la geotermia, pero faltaba investigación para el aprovechamiento en generación de electricidad. Por ello, en sus primeros cinco años (2010–2015), las líneas de investigación del CEGA se concentraron en entender los procesos geológicos, proponiendo alternativas para una exploración más sustentable, lo que involucra disminuir el riesgo de fracaso en las faenas de perforación.

Pasaron los años y la geotermia parecía ser otra vez solo un tema académico y que volvería a quedar en el olvido, pero tras casi un siglo desde las primeras exploraciones —realizadas en el norte por el ingeniero italiano E. Tocci—, en 2017 se pudo ver, por fin, la primera planta de generación eléctrica mediante geotermia en nuestro país: Cerro Pabellón, en la Región de Antofagasta, aportando a la matriz nacional 48 megawatts. Fue la primera planta del continente sudamericano, un botón de muestra del inmenso potencial que tenemos bajo nuestros pies. Entramos en el selecto club de países que generan electricidad limpia, constante y amigable con el medioambiente con geotermia.

Chile, el país con el potencial geotérmico inexplorado más grande del mundo, por fin dio un salto en la historia con la instalación de Cerro Pabellón, que aportará, gracias a su extensión, un total de 81 MW de energía limpia y estable desde 2022. Considerando el inmenso potencial geotérmico de Chile, esta producción es muy pequeña, no obstante, marcó un hito en el desarrollo de la geotermia en el país, confirmándola como una fuente viable para la generación eléctrica. Si bien reconocemos el gran avance de contar con la primera planta geotérmica de Sudamérica, nuestra evaluación es que el desarrollo geotérmico progresa a un paso lento en Chile, sobre todo si se compara a otras energías renovables, como la solar y la eólica.

El lento desarrollo y escaso aprovechamiento contrasta con el alto potencial geotérmico del país. A pesar de los beneficios para la sustentabilidad, sus usos de todo tipo no alcanzan siquiera el 1% de la oferta total de la producción de energía en el balance nacional para 2019.¹ La mayor parte de la energía usada en Chile proviene de combustibles fósiles. En ese contexto, la geotermia aparece con una producción de 0,24% en la matriz energética primaria, que se reporta en su totalidad como aportante a la generación de electricidad.

¹ Energía Abierta, “Balance Nacional de Energía 2019”, Comisión Nacional de Energía. <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/balance-de-energia/> (consultada el 5 de enero de 2022).

En este sentido, en la última década se observan avances no solo en la producción de electricidad con geotermia, sino que también la geotermia somera se ha ido abriendo camino. Entre los ejemplos destacados están los hospitales de Talca y de Rancagua, que cuentan con climatización con bombas de calor geotérmico, cumpliendo con las exigencias de las licitaciones para construir estos servicios públicos realizadas en el sistema nacional de compras públicas. Además, se suman iniciativas públicas y privadas que han permitido climatizar escuelas, invernaderos y hoteles, entre otras instalaciones.

En paralelo a los cambios en el contexto energético y socioambiental del país, el CEGA replanteó sus esfuerzos al terminar su primer quinquenio y denominó a su segundo periodo como “geotermia para la sociedad”. Esta opción implicaba promover el desarrollo de la geotermia de uso directo y con bombas de calor como un aliado para disminuir la pobreza energética y aumentar la adaptación al cambio climático. El uso del calor de la Tierra de manera directa corresponde al aprovechamiento de la diferencia de calor entre la superficie y el subsuelo, el cual puede ser usado para climatización de viviendas, escuelas, hospitales, invernaderos o procesos productivos que requieren calor, como plantas de secado. Si bien todo uso de la geotermia tiene beneficios ambientales, climáticos y de soberanía energética, el uso directo es además la forma más democrática de aprovechamiento del calor de la Tierra, porque está disponible en todo el territorio y en Chile es prácticamente ilimitado. De hecho, en el mundo los usos directos de la geotermia exceden en diez veces el uso para generación de electricidad.

Durante el segundo quinquenio del CEGA, las preocupaciones por la provisión energética a nivel nacional se habían apaciguado, pero surgían con fuerza las problemáticas socioambientales. Se evidenciaba, por ejemplo, la contaminación del aire en las ciudades del sur calefaccionadas con leña. Si bien esta problemática es de larga data, empezó a ser reconocida con la instalación de sistemas de monitoreo y la declaración oficial de “zonas saturadas” y “zonas latentes”, es decir, que superan la norma de calidad del aire o están en riesgo de hacerlo. Hidroaysén, el proyecto de construcción de una central hidroeléctrica en la Patagonia, era un conflicto abierto. La construcción de esta megacentral estaba planeada para 2010 y fue finalmente suspendida en 2017, el mismo año de la inauguración de Cerro Pabellón. Desde 2015, los conflictos socioambientales han ido en aumento, así como los procesos y demandas ciudadanas que llegan a juicios en tribunales.² Las controversias por el agua, los efectos contaminantes de algunas faenas productivas, y las llamadas zonas de sacrificio han estado presentes en las demandas expresadas en las manifestaciones sociales de los últimos años, exigiendo justicia ambiental. Si esto no había sido evidente

² *Javiera Barandiarán, Science and Environment in Chile. The politics of expert advice in a neoliberal democracy.* (Cambridge, MA: The MIT Press, 2018)

para toda la sociedad, las manifestaciones de octubre de 2019, del llamado “estallido social”, mostraron de manera innegable que las demandas por justicia y equidad eran sentidas por gran parte de la población.³

A estos ejemplos de cambio en las prioridades para la ciudadanía y la política pública se suma la preocupación por el cambio climático, percibido como un problema. Hoy en Chile la descarbonización es una política aceptada. La pregunta ya no es si tendremos una matriz baja en emisiones sino cómo hacerlo y en qué plazos. En este sentido, el país ha tomado compromisos internacionales, como su Contribución Nacional Determinada⁴ (NDC, por sus siglas en inglés), que establece la meta de carbono neutralidad al 2050 en un proceso de transición justa. Además, avanzan en el Senado los proyectos de ley de cambio climático y de finalización de las centrales termoeléctricas a carbón.

El contexto social, ambiental y de acción climática reafirmó la opción del CEGA de hacer esfuerzos concretos para promover los proyectos de uso directo de geotermia, lo que también se conoce como geotermia somera. Esta opción tiene también su justificación en el balance energético del país.⁵ La mayor parte es consumo de energía térmica, donde el uso directo de geotermia podría tener protagonismo, por ejemplo, para la climatización de ambientes y la provisión de agua caliente sanitaria. El balance nacional de energía muestra que la electricidad representó solo un 21% del consumo total de energía en Chile en 2019.⁶ Aún cuando las políticas de fomento apunten hacia la electrificación del consumo energético, y no tengamos todavía resultados de los procesos de planificación en curso, es de esperar que los usos térmicos sigan siendo significativos y la planificación energética pueda aprovechar la flexibilidad de estos usos para utilizar diversas fuentes.

Teniendo como contexto la situación de fuentes y usos de energía en el país, y los desafíos de sostenibilidad y justicia ambiental, este libro muestra lo que se ha avanzado en conocer y aprovechar la energía geotérmica en Chile, tanto para generación de electricidad como para sus usos directos desde las investigaciones y proyectos impulsados por CEGA. La energía geotermal y su relación con los seres humanos tiene orígenes muy anti-

³ Mauricio Folchi, editor. *Chile despertó. Lecturas desde la Historia del estallido social de octubre*. (Santiago, Chile: Universidad de Chile, 2019).

⁴ UNFCCC, Chile's Nationally Determined Contribution, Gobierno de Chile. https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Chile%20First/Chile%27s_NDC_2020_english.pdf (consultada el 5 de enero de 2022).

⁵ Energía Abierta, “Balance Nacional de Energía 2019”, Comisión Nacional de Energía. <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/balance-de-energia/> (consultada el 5 de enero de 2022).

⁶ *Ibid*

guos y en gran medida desconocidos.⁷ Reconociendo que la relación entre los habitantes de lo que hoy llamamos Chile con la fuente de calor de la Tierra y su expresión en el paisaje tiene una historia que comienza con los primeros asentamientos humanos, la opción para construir este libro fue tomar la perspectiva de la geotermia en su relación con la ciencia, la tecnología y la sociedad durante el siglo XX y hasta nuestros días.

La Fuente

La primera sección, que denominamos “La Fuente”, reúne dos capítulos que se refieren a cómo la sociedad chilena ha aprendido y desarrollado conocimientos sobre la geotermia y su comportamiento, desde las aproximaciones de los naturalistas del siglo XIX a la ciencia de geólogas y geólogos del siglo XXI. Las abundantes manifestaciones volcánicas y de aguas termales superficiales en nuestro país son parte del paisaje al que estamos acostumbrados, y que consideramos características identitarias del territorio. Estos capítulos muestran la relación de la sociedad chilena con la fuente de calor de la Tierra en la era moderna. A fines del siglo XIX comienzan las exploraciones que podemos llamar “científicas” y con fines de explorar el potencial del recurso para su aprovechamiento en la satisfacción de necesidades de la sociedad. En el capítulo “Paisajes Geológicos” se da cuenta de estas primeras exploraciones y de la relación de la sociedad chilena con la geotermia, durante una época en que la electricidad comenzaba a ser utilizada como fuente de energía para la industria y la geotermia había probado ser útil a estos fines en una zona volcánica de Italia. A fines del siglo XIX se valoraba también el poder curativo de las fuentes termales, que eran parte de los tratamientos recomendados por el higienismo. Por otra parte, el catastro del territorio era una acción de soberanía particularmente importante en regiones recientemente anexadas después de la Guerra del Pacífico.

El capítulo “Exploración Geotérmica” recorre la relación de la sociedad con el calor de la Tierra desde el punto de vista de la ciencia y de la política pública de fomento a la investigación y el desarrollo tecnológico. Un objetivo principal en esta relación, durante gran parte del siglo XX, fue la determinación del potencial geotérmico para producción de electricidad. Las capacidades para explorar y mapear el recurso se fueron desarrollando a lo largo del tiempo, principalmente en la academia y en colaboración con especialistas internacionales. Chile logró formar capacidades científicas en el área acordes al estado del arte en el mundo. Las capacidades de la segunda mitad del siglo XX exigían conocimientos y equipos

⁷ Raffaele Cataldi y Mario César Suárez, *History of Geothermal energy in the world, from its origins to the 20th century* (Pisa, Italia: Tipografia Editrice Pisana, 2020).

especializados, conocer el recurso implicaba perforar y medir. Algunas de estas capacidades contrastan con las aproximaciones de los naturalistas de principios de siglo, que ilustraban la topografía como un método de generación de conocimiento, y otros se asemejan, por ejemplo, en el análisis de la composición de las aguas termales.

Mucho se ha aprendido desde esos primeros años. Hay capacidades instaladas y conocimiento del recurso geotérmico tanto tácito —incorporado en las personas— como explícito —registrado en mapas y catastros—. Aún así, Chile tiene bienes inexplorados, entre ellos fluidos geotérmicos sin investigar, recursos geotérmicos de media entalpía que ni siquiera son parte de la agenda de discusión. El potencial geotérmico de Chile está distribuido democráticamente a lo largo y ancho de todo el país y no se ha considerado en las políticas y planes. Queda mucho por hacer. Conocer el recurso geotérmico es un deber soberano y una condición para aprovechar sus virtudes. La ciencia y la tecnología están disponibles y pueden contribuir a una utilización responsable.

La Oportunidad

El siguiente grupo de capítulos se reúnen en la sección “La Oportunidad”. Las tecnologías para aprovechar la geotermia en nuestro país están disponibles y han demostrado funcionar en terreno en aplicaciones de muy distinta índole. El capítulo “Usos de la geotermia y sus aplicaciones en Chile” muestra las principales aplicaciones tecnológicas, que se ilustran con ejemplos reales de experiencias en Chile. Especial atención tiene el uso de las bombas de calor geotérmico (BCG), un aparato que hace muy poco se ha comenzado a usar en nuestro país y que permite aprovechar la energía geotérmica en lugares donde no hay anomalías termales, es decir, donde las temperaturas del subsuelo son bajas (entre 90 °C y 30 °C) o muy bajas (menores a 30 °C). Un capítulo especial se ha dedicado a Cerro Pabellón, la primera planta de generación de electricidad con geotermia en Sudamérica.

En “Comunicación de la geotermia” se discute la experiencia de trabajar con una energía desconocida, que no es visible, un concepto que resulta poco tangible. La participación de la ciudadanía en las decisiones respecto de la geotermia necesita partir por comprender de qué se trata este recurso, cómo funciona, cómo se aprovecha. Lograr un piso mínimo para la participación es uno de los grandes desafíos de la comunicación de la geotermia.

La Voluntad

En la última sección, “La Voluntad”, se agrupan tres capítulos que indagan en la relación entre el recurso geotérmico, las tecnologías disponibles y la voluntad de aprovecharlas para usos sociales, o bien para definir una relación con ellas. Por una parte, está el rol del Estado en la relación de la ciencia, la tecnología y la sociedad con la geotermia, que se aborda en el capítulo “Actores políticos”. Las decisiones y acciones desde los diferentes poderes del Estado — ejecutivo, legislativo y judicial— muestran cómo ha cambiado el interés y motivación para tomar acción frente a la geotermia en el tiempo, pasando de un Estado que está reconociendo sus territorios, a uno emprendedor que busca mecanismos y energía para lograr la industrialización; y luego de un Estado con un rol subsidiario que se enfoca a proveer reglas del juego para la inversión privada, a uno que asume compromisos hacia la sustentabilidad, manteniendo el marco del rol subsidiario respecto del mercado.

El Estado es un actor social que ha tenido centralidad en la gobernanza de la geotermia mostrada en los capítulos anteriores, pero están también los actores privados y las comunidades que habitan los territorios donde se aprovecha la geotermia. La participación de estas últimas se dificulta dadas las grandes asimetrías de poder respecto de otros actores y los problemas de centralismo e inequidad característicos de la estructura del país. El capítulo “Geotermia y Sociedad” muestra la relación de las comunidades locales con algunas experiencias de instalación de proyectos geotérmicos. Una selección de intervenciones sociales implementadas por CEGA se describe en este capítulo, que incluye reflexiones sobre la importancia de integrar de forma temprana a comunidades locales, así como incorporar a diversos actores en el proceso de producción de conocimiento científico y en proyectos energéticos. Este capítulo reúne una selección de aprendizajes del área Geotermia y Sociedad del CEGA, unidad que se funda en el segundo periodo del centro.

Por último, el capítulo “Aysén, piloto geotérmico” presenta el caso del desarrollo de la geotermia de uso directo en la Patagonia, donde se han realizado experiencias en distintas aplicaciones del recurso. Si bien son usos incipientes, permiten demostrar que la geotermia somera es una solución energética viable desde el punto de vista técnico ante el grave problema de contaminación atmosférica de la región, debido al uso extendido de la leña y a la dependencia de energías importadas. El capítulo propone que la experimentación en la región ha sido posible gracias al compromiso de actores regionales. En su mayoría, los proyectos de la región han contado con financiamiento público, generando demanda para soluciones de proyectos con interés social, en esta etapa emergente de la tecnología donde la viabilidad económica no la hace competitiva ante las opciones

de energía fósil, a pesar de sus ventajas ambientales y de seguridad y soberanía energética. La alineación de diversos actores para el desarrollo de los proyectos demostrativos ha permitido aprendizajes y una incipiente base de capacidades locales.

El capítulo final contiene una reflexión sobre el futuro de la geotermia en Chile, lo que hemos aprendido, las recomendaciones para acelerar el paso, lo que nos parece son deberes que la ciudadanía debiera exigir al Estado, y una reflexión sobre las capacidades que se han ido ganando a lo largo de la década. Creemos que estas capacidades debieran valorarse, porque pueden abrir el camino hacia un futuro donde la geotermia tenga un lugar importante en la matriz energética y pueda aportar a la soberanía energética y la justicia ambiental y social.

PALABRAS DEL ILUSTRADOR

Ignacio Ortega

En comunicación visual se utilizan signos icónicos para representar los conceptos más relevantes a transmitir y narrar con ellos. El agua, el territorio físico, el cántaro de barro y la comunidad de personas son algunos de los signos protagonistas de las ilustraciones que, imagen a imagen, van tejiendo el relato de la geotermia y su incorporación a la matriz energética y al cotidiano de nuestra sociedad.

Por otro lado, los signos plásticos conforman el código a través del cual las ilustraciones nos transmiten sensaciones o ideas abstractas. Para este proyecto decidimos trabajar con colores rojo, azul y sus variaciones (anaranjados y violetas) para representar el calor en el agua. La saturación de los colores y su intensidad lumínica nos sirven para reforzar la importancia de la energía en el relato. Los trazos orgánicos de la pintura y sus texturas buscan incorporar lo geológico en el mensaje. La morfología de las formas evita los ángulos, llenando las páginas de representaciones curvas, amables, ovoidales en el caso de los cántaros, con la intención de plasmar atributos cercanos, amables, vinculados a la idea de bienestar.

En la primera sección, La Fuente, se abordan los orígenes históricos de la geotermia en Chile desde diversas disciplinas y con una mirada interdisciplinaria. Con la ilustración buscamos sentar las bases del relato visual; comenzar desde una metáfora cercana, afectiva, encarnando de cierta forma una sabiduría ancestral: la energía que siempre ha estado ahí. La mujer con el cántaro de barro, objeto tecnológico que guarda, conserva y transporta líquidos nos pareció ideal. Ella siempre dirige su mirada hacia el futuro.

En la segunda parte del libro, La Oportunidad, el foco fue reconocer que pertenecemos y participamos de un ecosistema, y desde ahí se identifica una oportunidad energética. Situarnos, palpar la tierra y hacer uso de sus bondades para calefaccionar nuestros hogares o escuelas, en un contexto de cambio climático, son acciones que llevadas a la representación visual pueden hablar por sí mismas de los beneficios de la geotermia.

La ilustración de la tercera sección titulada La Voluntad conllevaba el desafío de representar los sueños y metas, debía teñirse de liderazgos positivos, ayudando a las lectoras y lectores a imaginar un futuro posible donde la geotermia fuese un aporte sustancial a sus comunidades. La lideresa cargando el cántaro de barro, como objeto que no tan solo es tecnología sino también cultura, guía a una comunidad a través de un sendero azul. Esta personificación e intención en la dirección busca entregar un mensaje positivo, recordándonos que siempre y cuando exista voluntad podemos beneficiarnos transversalmente de los usos y aplicaciones de la geotermia a mediano y largo plazo, como relata el texto.



LA FUENTE

Capítulo I

Paisajes geológicos: imagen, medida e imaginación en la formación del conocimiento geotermal

Capítulo II

Exploración geotérmica en Chile: qué sabemos y cómo aprendimos del potencial geotérmico

CAPÍTULO I

Paisajes geológicos: imagen, medida e imaginación en la formación del conocimiento geotermal

Martín Fonck, María José Correa Gómez y Catalina Valdés

1. Introducción

Fenómenos geológicos de la cordillera de los Andes, como volcanes, aguas termales y géiseres, han animado la imaginación científica y cumplido un rol fundacional en la construcción de los paisajes que remiten al territorio chileno. Si bien todas las culturas humanas que se han desarrollado en torno a los Andes han generado un conocimiento ligado a la montaña, es desde comienzos del siglo XIX que hombres y mujeres se abocaron a explorar estos hitos de la naturaleza y describirlos en términos de las ciencias modernas. Valiéndose de diversas técnicas y materiales, estos primeros naturalistas fueron componiendo paisajes a partir de su percepción. En esas experiencias y modos de comprensión del entorno, se encuentran las bases de las ideas científicas que hoy conforman el saber geotermal.

En este capítulo proponemos realizar un recorrido por los modos de ver y componer tres escenarios de la cordillera de los Andes: el volcán Antuco, los baños de Cauquenes y los géiseres del Tatio. Este recorrido se enmarca temporalmente entre inicios del siglo XIX y las primeras décadas del siglo XX, momento en que se afirma un imaginario paisajístico nacional ligado a un territorio en plena expansión, disputa y reconocimiento.

Revisar el imaginario construido en torno a estos tres escenarios permite explorar la identificación de ciertos fenómenos de la naturaleza con aspectos de la geopolítica, la economía y la identidad cultural de un país en pleno proceso de organización republicana. Permite, en los términos más generales de la historia de las ciencias, revelar la historicidad de los presupuestos científicos, exponiendo los mecanismos con que se fueron instaurando los principios de orden y objetividad impulsados por la progresiva organización disciplinar de los saberes de la naturaleza, homogeneizando en apariencia los más diversos modos de significar la realidad.¹

Dentro de esta condición histórica de los principios científicos, la imagen ocupa un lugar central. Este ensayo se propone observar las relaciones entre imagen y ciencias geológicas, deteniéndose en ellas como muestras de una producción visual con técnicas y estilos particulares, que aporta densidad al contexto de divulgación de conocimiento científico en que circulan.

¹ Jonathan Smith, *Fact and feeling: Baconian science and the nineteenth-century literary imagination*. (Londres: University of Wisconsin Press, 1994). Lorraine Daston, "Fear and loathing of the imagination in science", *Daedalus*, 127 (1998): 73-93.

Al revisar los relatos de las primeras exploraciones a estos escenarios cordilleranos, reconocemos a los actores que los fueron componiendo como lugares de ciencias. Científicos, en su mayoría hombres provenientes de Europa, fueron convocados en muchos casos por el Estado chileno para impulsar el campo científico local. Poniendo a prueba conocimientos adquiridos en otras latitudes, recorrieron Chile midiendo y tomando muestras con la tarea de inscribir este territorio, que se les ofrecía como inexplorado, en el concierto global de las ciencias. Es importante recordar que, en sus travesías, estos actores se valieron además de saberes locales, a veces ancestrales, enunciados por colaboradores con una experiencia previa en el terreno y particulares modos de comprensión de los fenómenos geológicos.

La colaboración entre los científicos “profesionales” provenientes de Europa y estos agentes locales, transforma a los escenarios analizados en “zonas de contacto”, áreas de intercambio cultural que, para el siglo XIX, mantenían muchos de los términos de una dinámica de transferencia y apropiación colonial. Debido a la escasa huella que guías, guardias, cargadores e informantes dejan en las fuentes históricas con que se compone este tipo de relatos, quedan con frecuencia invisibilizados.² Si bien quisiéramos haber recuperado aquí algo más que nombres o funciones, este trabajo cumple al menos con dejar señalada esta ausencia, señalando que se trata de un tema a trabajar en próximas investigaciones.

A lo largo de nuestro análisis, los tres escenarios serán atravesados por preguntas que refieren a las experiencias de exploración, reconocimiento, descripción, uso y divulgación de fenómenos geológicos que determinaron, desde comienzos de la República, la representación del territorio nacional. ¿Cómo los escenarios que albergan estos fenómenos geológicos se vuelven paisaje? ¿Cuáles son las imágenes con que se construye el paisaje geológico en Chile? ¿Cómo inciden los propios fenómenos geológicos en las maneras de representar el paisaje? ¿Qué intereses movilizan la formación de los paisajes geotermiales? ¿De qué manera las diferentes formas de aproximación a la naturaleza se conjugan en la conformación de un paisaje?

² La figura del colaborador, entendida como mediador entre saberes de diversos regímenes culturales o *go-between*, ha sido definida por Raj y Schaffer, en el contexto científico europeo y asiático, como aquel agente que es capaz de conocer, articular, traducir y negociar entre mundos o culturas dispares, ubicándose, por tanto, al centro de la producción de la ciencia globalizada en la era moderna. Véase Simon Schaffer, Lissa Roberts, Kapil Raj, James Delbourgo (Editors), *The Brokered World: Go-Betweens and Global Intelligence* (2016). Bernard Lightman (editor), *A companion to the History of Science* (Wiley Blackwell: UK-USA: 39-57); también Schaffer et al., *The Brokered World Go-Betweens and global Intelligence 1770 – 1820* (Science History Publications: Sagamore Beach, MA, (2009). Otro antecedente anterior es el trabajo de Steven Shapin (1989), *The Invisible Technician*. *American Scientist*, 77(6): 554-563. El término *zona de contacto* es también trabajado por Kapil Raj (2007), *Relocating Modern Science. Circulation and the Construction of Knowledge in South Asia and Europe, 1650-1900*. Nueva York: Palgrave Macmillan. El autor toma este concepto del clásico libro sobre historia cultural poscolonial de Mary Louise Pratt (1992), *Imperial Eyes: Travel Writing and Transculturation*. Londres y Nueva York: Routledge.

2. Paisajes geológicos: imágenes, experiencias de medición e imaginación

El concepto de “paisaje” se asocia inicialmente al arte de representar vistas naturales o urbanas mediante la pintura, principalmente a la manera en que esta fue cultivada por artistas de los Países Bajos del siglo XVI.³ A comienzos del siglo XIX, el concepto migró al ámbito de la historia natural de la mano de científicos exploradores como Alexander von Humboldt, sirviendo para transmitir la compleja integración entre experiencia estética de la naturaleza y métodos de percepción, descripción y representación más sistemáticos.⁴ Más tarde, ya a comienzos del siglo XX, el sociólogo alemán Georg Simmel observó en la densidad de las manifestaciones humanas —lenguas, tecnologías, identidades, etc.— una suerte de “segunda naturaleza”, que otorgó a la noción de paisaje una compleja dimensión cultural, ligada a la modernidad.⁵

En las últimas décadas, el término paisaje ha expandido sus usos, tanto en las humanidades y ciencias sociales como en las ciencias naturales. Como resultado, una corriente de investigaciones inscritas inicialmente en campos diversos del saber, encuentran en este término un punto de confluencia desde el cual es posible estudiar complejas interacciones entre la cultura humana y la naturaleza, incluyendo discursos, imágenes, tecnologías y saberes específicos.⁶

El término paisaje nos convoca —la autoría de este ensayo reúne a una historiadora del arte, a una historiadora de la ciencia y la tecnología, y a un antropólogo— a pasar de un entendimiento del concepto como imagen estática y externa, a la experiencia subjetiva, a un modo de ver y comprender el entorno, una representación del espacio atravesado por temporalidades, contextos y procesos de vida. El paisaje se torna así un campo de estudio interdisciplinario que permite abordar los escenarios del conocimiento geotermal en su historicidad, compuestos por experiencias de terreno, métodos de descripción, medición y representación, escenarios determinados por las vías de circulación e institucionalización de los saberes que fueron colaborando en la construcción del conocimiento científico del territorio chileno.

³Victor I. Stoichita, *La invención del cuadro: arte, artífices y artificios en los orígenes de la pintura europea*. (Madrid: Serbal, 1993). Claudio Tesser, “Algunas reflexiones sobre el significado del paisaje para la geografía”, *Revista de Geografía Norte Grande* 27 (2000):19-26.

⁴Alexander von Humboldt, *Cosmos. Ensayo de una descripción física del mundo*. Edición e introducción de Sandra Rebok; prólogo de Miguel Ángel Puig-Samper; epílogo de Ottmar Ete. (Madrid-Santiago: Libros de la Catarata, Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Dibam, 2011).

⁵Georg Simmel, *El individuo y la libertad. Ensayos de crítica de la cultura*. (Barcelona: Península, 1998).

⁶Eric Hirsch y Michael O’ Hanlon, *The Anthropology of Landscape: Perspectives on Place and Space*. (Oxford: Oxford University Press, 1995); Christopher Y. Tilley, *A Phenomenology of Landscape: Places, Paths, and Monuments*. (Oxford: Berg, 1994); Tim Ingold, *The Perception of the Environment* (London: Routledge, 2000); Anne Lowenhaupt Tsing, *Viver nas nuínas: paisagens multiespécies no Antropoceno*. (IEB-Mil folhas: Brasília, 2019).

Siguiendo estas ideas, en este capítulo nos interesa explorar paisajes geológicos como formaciones históricas, observar las prácticas de exploración, de medición en terreno y de creación de imágenes como partes (un poco olvidadas) del método científico que se propone dar a ver las dinámicas de la Tierra. Nos interesa promover con esto dos ideas: los paisajes geológicos que aquí estudiamos son el resultado del encuentro entre volcanes, aguas, rocas y subjetividades formadas en un contexto intelectual delimitado por las ciencias modernas. Antes que ser elementos pasivos representados en una escena, son entidades que determinan la forma en que son explorados y participan activamente en la producción del paisaje. Observar estas subjetividades es, por tanto, una vía para comprender los modos en que se ha producido el conocimiento geotermal del territorio de Chile. Nuestra intención con ello es valorar ciertas prácticas de terreno que, en el contexto actual de la producción científica, acaban quedando fuera, precisamente por ser portadoras de esa subjetividad.

Esta mirada nos permite constatar que, por ejemplo, los paisajes que emergen, dentro del marco temporal estudiado, a partir de fenómenos geológicos locales, son concebidos a través del prisma de otras geografías, esencialmente europeas. Así, las representaciones de la primera ascensión al volcán Antuco se encuentran atravesadas por la experiencia del Vesubio en Nápoles; las termas de Cauquenes fueron concebidas como sitios de salud desde el prisma de los centros termales franco-alemanes; y la localidad de Larderello, en la Toscana, resultó una inspiración para exploraciones que imaginaron los géiseres del Tatio como un centro potencial para producir energía geotérmica.

La elección de estos tres escenarios responde a diversos aspectos geohistóricos: el volcán Antuco fue un punto de referencia para las experiencias en terreno de los naturalistas que llegaron desde Europa después de la declaración de independencia de Chile y, en varios casos, convocados por los gobiernos locales para contribuir al establecimiento de las primeras instituciones republicanas.

Considerando que hasta entrada la segunda mitad del siglo XIX, las fronteras internas de Chile llegaban hasta el río Biobío, los volcanes a los que estos naturalistas tuvieron acceso con mayor frecuencia fueron principalmente el Antuco y los Nevados de Chillán. Como era habitual —y lo es aún, aunque de otras maneras— los exploradores generaron imágenes (dibujos, acuarelas) hechos en terreno (“al natural”), que en algunos casos pasaron después a ser diagramas, láminas o cartografías impresas. El hecho de haber sido el Antuco objeto de sucesivas exploraciones, permite emprender un estudio comparativo entre cada una de las imágenes que van componiendo este paisaje volcánico, para reconocer sus continuidades, diferencias y la influencia que fueron teniendo los recuentos de cada expedición.

Cauquenes, por su parte, fue un sitio cardinal para los naturalistas, viajeros y bañistas interesados en conocer en terreno las aguas termales; no solo por su cercanía con Santiago, su impronta cordillerana y su interesante infraestructura, sino por su capacidad de construir y difundir un relato sobre sus paisajes, que articuló criterios geológicos con nociones médicas y comerciales. El haberse conformado como un atractivo destino por alrededor de un siglo, generó —al igual que en Antuco— ricas escenas que fueron plasmándose en distintos tipos de registros: informes científicos y químicos, relatos de viaje, cartas de bañistas y viajeros, y dibujos, acuarelas, croquis y fotografías, entre otros, que ensambladas y analizadas, aportan entradas muy enriquecedoras de sus distintos paisajes en el transcurso del tiempo.

El Tatio, finalmente, es un sitio icónico para la imaginación geotérmica en la cordillera de los Andes. Desde el punto de vista de la historia de la energía geotérmica como tecnología para la generación de energía eléctrica; se trata del primer sitio donde se desarrollaron exploraciones con un foco exclusivamente geotérmico en Chile y Sudamérica. Fruto de estos trabajos científicos y de ingeniería, existen informes que contienen registro de un imaginario geotérmico industrial y tecnológico de la cordillera, inspirado en la emanación de vapor de los géiseres. Si bien el desarrollo de estos proyectos geotérmicos y su tecnología focalizada en la producción de energía eléctrica fue abandonado —sin generar representaciones que hayan adquirido reconocimiento a escala nacional—, durante la exploración de sus potenciales se compusieron reportes científicos que han continuado circulando, abriendo ahora la posibilidad de reconocer en ellos experiencias de paisaje.

El estudio de estos tres casos no solo da cuenta de los imaginarios geohistóricos que componen los paisajes que remiten a la tierra americana vista aún desde el referente europeo; también nos permite profundizar en los modos de producción de los saberes científicos. Las preguntas sobre la datación de afloramientos rocosos y formas geológicas, sobre las cualidades y atributos del agua termal, sobre la química del vapor o sobre la frecuencia de los géiseres, se encuentran mediadas por las experiencias de terreno en la que confluyen agentes de diversos saberes. ¿De qué manera en las representaciones del paisaje se superponen conocimientos de sujetos locales, cuyas experiencias en terreno anteceden o acompañan a la sistematización que viajeros, naturalistas o científicos hacen de ella? ¿Qué función toman estas experiencias en la producción del conocimiento geotermal? ¿Cómo su ausencia se hace presente en las representaciones de los paisajes geológicos?

3. Volcán Antuco: imagen y mecanismos de ajuste disciplinar

Las imágenes de volcanes realizadas por naturalistas y artistas de principios del siglo XIX dan cuenta de una naturaleza que parece haber quedado súbitamente expuesta por un cambio de perspectiva. A partir de esta transformación emergieron teorías científicas con un carácter revolucionario para la época y generaron profundos ajustes disciplinares en el campo de las ciencias de la Tierra. Prestar atención a estas imágenes permite relevar el trabajo de creatividad y de ampliación de imaginarios de naturalistas y artistas (litógrafos, cartógrafos, editores) involucrados en el ejercicio de dar a ver lo que hasta entonces no era visible: las fuerzas ígneas subterráneas movilizándolo a la Tierra para dar lugar a formas y dinámicas de múltiples alcances. Porque por mucho que los volcanes hayan estado siempre a la vista, solo fueron a convertirse en objeto de representación moderna cuando las ciencias se preguntaron por su naturaleza, intentado superar su condición de gigantes desconocidos, inabarcables, impredecibles y excepcionales. Imágenes y relatos como los que se comentarán aquí, exponen lo invisible por abordar de un fenómeno que evoca una escala temporal que para inicios del siglo XIX permanecía aún inexplorada, y describir un fenómeno que no cabía en el campo de visión que hasta entonces enmarcaba habitualmente la mirada. Este exceso de percepción sensorial provocó una expansión de los límites de la representación y, como consecuencia, una inmensa cantidad de imágenes que buscaban representar su naturaleza y funcionamiento.

Pasadas las controversias entre las diversas teorías de formación de la Tierra, que proliferaban a fines del siglo XVIII, los volcanes fueron asimilados como agentes principales de la metamorfosis del planeta, asentando el entendido que en la forma de las cosas está inscrita la historia de sus cambios.⁷ Una mayor precisión de las observaciones en terreno, combinada con una ampliación de los territorios recorridos por naturalistas esparcidos por el mundo, contribuyó a confirmar las propuestas enunciadas por el geólogo escocés James Hutton.⁸ Tal como expresó en su disertación titulada *System of the Earth, its Duration and Stability*, pronunciada en la Real Sociedad de Edimburgo en 1785, la reconsideración de las fuerzas ígneas profundas debía hacer retroceder la teoría neptuniana que admitía al agua como principal agente de modelación de la superficie terrestre. Esta última hipótesis, denominada neptuniana y defendida principalmente por el geólogo prusiano Gottlob Werner, explicaba la composición del suelo

⁷ Jean Marc Besse, *Voir la terre. Six essais sur le paysage et la géographie*. (École du paysage de Versailles-Marseille & Actes Sud, 2000)

⁸ Cándido Manuel García Cruz, *Teoría de la Tierra (1785, 1788) de James Hutton: Visión cíclica de un mundo cambiante, La Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* (Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, AE-PECT, 2004).

como producto de la cristalización de rocas y de su progresiva decantación y erosión en antiguos fondos marinos, entendiéndolo al agua como la única fuerza natural capaz de modelar la capa superficial de la Tierra.

El cambio de paradigma sirvió de base para la teoría de diferenciación de estratos y distinción de épocas geológicas, planteada algunos años después por Charles Lyell, otro geólogo escocés,⁹ y por Leopold Buch, paleontólogo alemán cercano a Humboldt.¹⁰ Extendiendo lo avanzado por Hutton, Lyell llegó a entender los volcanes como parte de un sistema de alcance global y no como fenómenos aislados de combustión superficial. Este conjunto de teorías desencadenó un cambio de perspectiva que alteró las concepciones científicas occidentales de escala espacial y temporal. Al igual que otros planteamientos de la historia natural de fines del siglo XVIII —reconocidas por sus propios contemporáneos como revoluciones epistemológicas—, las observaciones realizadas en torno a los volcanes abrieron ventanas al tiempo profundo, expresión que sirvió a Hutton para sintetizar una experiencia que ampliaba el pasado en varios miles de años.¹¹ El volcán emergió, entonces, como un fenómeno paradójico: manifestación de temporalidades simultáneas de permanencia y cambio, evento fugaz de un proceso que tarda eras en desarrollarse. Y en ese marco, el paisaje geológico cobró un valor analítico equivalente a algunas formas de cartografía, pero con la particularidad de incluir la dimensión temporal de larga duración —captada por la mirada individual, la perspectiva y la experiencia— como un dato de conocimiento de la realidad. La morfología —aspecto central en la clasificación botánica, tal como era practicada entonces— pasaba a constituir un factor determinante a la hora de describir los fenómenos e inscribirlos en los anales de la geología universal.

Describir las formas geológicas orientó las prácticas de exploración de los naturalistas, quienes en sus relatos posteriores se esmeraron en detallar contornos, texturas y tonalidades del paisaje geológico, expandiendo constantemente los límites del lenguaje científico por medio de metáforas y neologismos. Por las condiciones difíciles —a veces extremas— de las exploraciones, la medición de los fenómenos solo podía hacerse por medio de instrumentos básicos como el barómetro, el termómetro, varillas y el propio cuerpo transformado en unidad de medición y experimentación. Todo esto se complementaba con la toma de muestras de rocas y aguas, el reconocimiento botánico y la práctica del dibujo en terreno —que contribuía a dar cuenta del contexto de las experiencias— y los datos ob-

⁹ Charles Lyell, *Principes de géologie, ou illustrations de cette science empruntées aux changements modernes que la Terre et ses Habitants ont subis*. (Paris: Langlois et Leclercq, 1843).

¹⁰ Björn Kröger, "Remarks on a scene, depicting the primeval world – A talk given by Leopold von Buch in 1831, popularizing the Duria antiquior." In: HiN - Humboldt im Netz. Internationale Zeitschrift für Humboldt-Studien XIV, 27, S. (Potsdam – Berlin, 2013).

¹¹ Stephen Jay Gould, *Time's arrow, time's cycle: myth and metaphor in the discovery of geological time*. (Cambridge & London: Harvard University Press, 1996).

tenidos al momento de redactar los reportes de exploración. La fascinación por los volcanes y los fenómenos de la alta montaña, la expansión de los imaginarios científicos y la progresiva acumulación de datos en diversos puntos de la Tierra, hicieron de las montañas verdaderos laboratorios al aire libre y del territorio andino de Chile un punto cada vez más conectado a las ciencias geológicas de alcance global.

En febrero de 1829, Eduard Friedrich Poeppig (1798-1868) logró el primer ascenso registrado hasta el cráter del volcán Antuco, dedicando a este episodio todo el último capítulo de su relato de viaje por Chile.¹² Siguiendo en buena medida los pasos del prusiano, el naturalista francés Claudio Gay (1800-1873) realizó el ascenso a fines de febrero de 1839, experiencia que derivó en una serie de observaciones botánicas y zoológicas inscritas en los diferentes tomos de su obra sobre Chile. Sin poder alcanzar el cráter, el geólogo de origen polonés Ignacio Domeyko (1802-1889) realizó la ascensión al volcán en febrero de 1845, tras lo cual redactó una memoria que marca un precedente para las ciencias geológicas del territorio de Chile.¹³ Rodolfo Amando Philippi (1808-1904), médico y naturalista alemán, subió el volcán en 1862 e incluyó sus observaciones sobre fósiles y botánica en diversas publicaciones. Cerrando este primer ciclo de ascensiones científicas, el geógrafo francés Pedro José Amado Pissis (1812-1889) llegó hasta el cráter del Antuco en 1869, escribiendo acerca él en su obra principal sobre la geografía del país.¹⁴

Esta sucesión de excursiones permite observar las dinámicas del trabajo en terreno desde una perspectiva comparativa, evidenciando que cada nueva excursión se nutre de la lectura del relato anterior, generando una continuidad en las observaciones, a la vez que una progresión en el conocimiento de ciertos aspectos. Permite destacar, además, coincidencias notables como el hecho de que un mismo guía, el arriero Antonio Berra, acompañara tanto a Poeppig como a Domeyko en sus respectivas ascensiones. Otros aspectos sociales de la región van quedando también registrados como parte de la experiencia en terreno: si a fines de la década de 1820, Poeppig transita por un territorio en disputa entre moluches y pehuenches, zona de pillaje y de precario control por parte del ejército chileno; a fines de 1860, Pissis recorre una región completamente integrada al mapa de la nación.

¹² La crónica del viaje de Poeppig se tituló *Reise in Chile, Peru auf dem Amazonen 1827-1832* y se compuso por dos volúmenes más un atlas de ilustraciones, publicados en Leipzig por F. Fleischer entre 1835 y 1837. Para esta investigación trabajamos con la edición (bastante intervenida) del germanista chileno Carlos Keller (Santiago: Zig-Zag, 1960), única versión en castellano disponible hasta ahora, de acceso digital en el sitio web de la Biblioteca Nacional, www.memoriachilena.cl.

¹³ Ignacio Domeyko, *Memoire sur la composition geologique du Chile a la latitude de Concepción, depuis la baie de Talcahuano jusqu'au sommet de la Cordillere de Pichachen, comprenant la description du volcán d'Antuco*, presentado en el París en 1840 e integrado en castellano al tomo V de su obra *Jeología*. (Santiago: Imprenta Cervantes, 1903).

¹⁴ Pedro José Amado Pissis, *Geografía física de la República de Chile*. (Santiago: Biblioteca Fundamentos de la construcción de Chile, Dibam, 2011. Año de publicación del libro original: 1875).

La propia vida del volcán sufrió modificaciones en ese lapso de tiempo: si bien desde los primeros registros su cráter se mantenía activo, resulta interesante considerar que en 1861 se produjo una erupción mayor que permitió a los dos últimos viajeros internarse en un paisaje en plena mutación, abriendo la posibilidad a nuevas observaciones geológicas y químicas ligadas a la particular composición de los gases que emanan de él, distinta a la de las formaciones volcánicas más cercanas.

Así, el paisaje del Antuco se fue componiendo como un *collage* con la suma de estas experiencias de terreno que, además de quedar registradas en textos, generaron imágenes por medio de diversas técnicas y estilos. En el *Atlas* de Poeppig son varias las imágenes dedicadas a la excursión volcánica y entre ellas, es notable la inclusión de un autorretrato en donde el naturalista aparece inserto en el paisaje, munido de los pocos instrumentos que logró cargar durante la ascensión: una vara y un cartapacio donde probablemente guardaba las hojas sobre las cuales dibujó (Figura 1). También Gay publicó en su *Atlas* un retrato, grupal en este caso, en el que no sin humor, muestra a sus compañeros de ascensión huyendo de las erupciones en pleno cráter (Figura 2).



Figura 1. “El Volcán Antuco”. Grabado por Johann Nepomuk Ott (1804-1860) a partir de dibujo de Eduard Poeppig (1797-1868). Publicado en *Reise in Chile, Peru auf dem Amazonen 1827-1832*. (Leipzig: F. Fleischer, 1835-36; 2 vols; atlas con ilustraciones litográficas, 2 vols).



Figura 2. “Visita al Volcán de Antuco al momento de una erupción de gas (1 marzo 1839)”. Litografía de Lehnert a partir de dibujo de Claudio Gay. Incluido en *Atlas de la Historia física y política de Chile*. (París: Thunot, 1854).

Ambos incluyeron además escenas de tipo pintoresco, que muestran al volcán como parte de un paisaje cultural; en el caso de Poeppig, zona de frontera en plena disputa y, en el caso de Gay, región de costumbres que dan cuenta de relaciones entre humanos y naturaleza (Figuras 3 y 4). Domyko y Philippi, en cambio, realizaron croquis de carácter más descriptivo, utilizando el método de representación de perfiles de montaña para dar cuenta del conjunto volcánico del Antuco y la Sierra Velluda desde diferentes ángulos, mostrando la vinculación de estos dos hitos (Figuras 5 y 6).



Figura 3. "Pehuenches". Grabado por Johann Nepomuk Ott (1804-1860) a partir de dibujo de Eduard Poeppig (1797-1868). Publicado en *Reise in Chile, Peru auf dem Amazonen 1827-1832*. (Leipzig: F Fleischer, 1835-36; 2 vols; atlas con ilustraciones litográficas, 2 vols).



Figura 4. "Caza á los Guanacos (cerca del volcán Antuco)". Litografía de Lehnert a partir de dibujo de Claudio Gay. Incluido en *Atlas de la Historia física y política de Chile*. (París:Thunot, 1854).

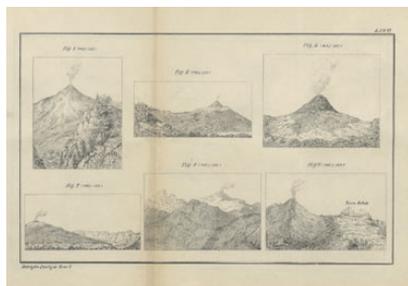


Figura 5. "Lám. VI". Includida en el libro *Jeología* de Ignacio Domeyko. (Santiago: Imprenta Cervantes, 1903).



Figura 6. *Volcán Antuco y la Sierra Velluda*, 1862. Rodulfo Amando Philippi. Acuarela sobre papel, 11,3 x 18,7 cm. Colección Museo Histórico Nacional.

Finalmente, Pedro José Aimée Pissis, dotado de una notable sensibilidad artística, pintó una acuarela del volcán desde su base, enmarcando al monte en un contexto rural (Figuras 7 y 8). Para su atlas impreso escogió, en cambio, una espectacular vista del cráter coloreada con innovadoras técnicas gráficas, respondiendo probablemente a la curiosidad que despertaban los volcanes en un público no especializado, pero asiduo a las publicaciones de viajes, tan de moda en la época.

Esta secuencia de imágenes, así como los textos a los que están vinculadas, nos permiten analizar también el desarrollo de las prácticas científicas durante el período comprendido en estos casi treinta años de exploraciones. El relato de los tres primeros exploradores está bastante enfocado en las dificultades que imponía el trayecto, algo que luego Philippi y Pissis obviaron, tal vez queriendo pulir la dimensión biográfica y anecdótica del relato y respondiendo a las cada vez más depuradas formas de narración científica.



Figura 7. *Volcán Antuco*, c. 1860. Acuarela de Pedro José Aimé Pissis. Colección MHN, Santiago de Chile.



Figura 8. *Interior del cráter del volcán de Antuco*. Cromolitografía de Eugène Ciceri a partir de Pedro José Aimé Pissis. Incluido en *Atlas de la Geografía de Chile*. París: Delagrave, 1875. Biblioteca del Muséum, París.

Las preguntas que cada naturalista va respondiendo son también distintas, aunque esto, más que dar cuenta de una progresiva normalización de la enunciación, informa de las parcelas de interés que marcan la práctica naturalista de cada cual: Poeppig, Gay y Philippi comparten un notable conocimiento botánico, lo que les permite reconocer especies e ir completando o corrigiendo las clasificaciones de su antecesor, así como ir recolectando ciertas especies con el fin de formar un herbario del volcán. Domeyko y Pissis, formados en la Escuela de Minas de París, coinciden en las observaciones geológicas, mineralógicas y topográficas, contando para ello con instrumentos de precisión, como el barómetro y el termómetro, y recolectando muestras de rocas y aguas para ser analizadas en gabinete. Salvo el primero, todos los otros viajeros realizan su excursión respondiendo a encargos del Estado chileno; son por tanto científicos oficiales que —con sus informes— deben rendir cuentas y sistematizar una información de interés público y de carácter geopolítico. La condición de extranjeros de estos cinco científicos (su acceso a publicar en otras lenguas y a presentar sus observaciones en centros de producción del saber naturalista, como París y Leipzig, por ejemplo) facilitó la rápida inclusión de este paisaje al atlas universal. Con ello, el volcán Antuco, junto a otros hitos de la región, pasó a informar aspectos que alimentaban una visión integral de la Tierra, demarcando datos como altitud, línea de nieve, características geomorfológicas y biogeográficas, dinámicas físicas, químicas y magnéticas que componían un mapamundi cada vez más complejo.

Hacia el final del siglo XIX, este conjunto de conocimientos permitió, por ejemplo, elaborar hipótesis que expandían el paisaje andino a un sistema volcánico de escala planetaria: el conocido Círculo o Cinturón de Fuego del Pacífico, propuesto a fines de la década de 1880 por el sismólogo francés Fernand Montessus de Ballore —otro científico contratado por

el Estado chileno —, y divulgado a fines del siglo por el notable geógrafo, también francés, Elisée Reclus.¹⁵ Si bien esta hipótesis perdió protagonismo durante el siglo XX, representó un adelanto para concebir la teoría hoy asentada de la tectónica de placas. Sin las experiencias subjetivas y parciales recolectadas en terreno, sin la concepción de paisajes particulares e integrados, estas ideas de alcance global no habrían tenido sustento.

4. Las termas de Cauquenes: espacio de medición de las aguas para estudios científicos y médicos

Los baños termales, al igual que los volcanes, constituyeron sitios paradigmáticos, con identidades y temporalidades diversas y en disputa. Fueron espacios de exploración y ciencia, de salud y recreación, así como de consumo y de placer. Pese a esta diversidad, presentan un patrón dominante que refiere a la relación entre lo geológico y lo médico. El análisis de los diversos paisajes construidos en torno a ellos permite profundizar en esta relación, en sus cambios y características, y en las formas que aportaron en la conformación de sus diversas identidades.

El carácter médico de Cauquenes no era una incógnita en el pasado. El Abate Molina (1740-1829) reconoció a estas termas como uno de los baños más frecuentados y a “los araucanos” como sus primeros visitantes, quienes encomendándose a *Meulén*, llamado también *Gencovunco* — Señor de las aguas minerales, en mapuzugün — identificaron tempranamente su carácter curativo.¹⁶

Tras la Independencia comenzaron a ganar prestigio, apoyados del desarrollo que la hidroterapia había alcanzado en Europa desde mediados del siglo XVIII — asociada a la figura de Vincenz Priessnitz (1799-1851) y al surgimiento del *spa* termal encarnado en sitios como Vichy, Gräfenberg o Aix-les-Bains. — Con estas influencias, las aguas termales nacionales fueron objeto de nuevos escrutinios en los que se buscó definir sus cualidades y clasificarlas en coherencia a las características asignadas a sus pares europeos. En este proceso fue fundamental la acción de los naturalistas. Estos viajeros, hombres en su mayoría, serían el rostro visible del estudio sistemático y colectivo de las aguas termales de Chile a través de un centenar de trabajos sobre geología, mineralogía, meteorología, hidrología y medicina. En ellos traducirían la información de las aguas entregada por los locales y sumarían los ejercicios de observación y análisis realizados por ellos mismos y por sus ayudantes, generando uno de los primeros retratos científicos de los baños de la zona central de Chile.

¹⁵ Jean-Marie Vila, *Dictionnaire de la tectonique des plaques et de la géodynamique*. (París: Gordon and Breach Sciences Publishers, 2000).

¹⁶ Juan Ignacio Molina, *Compendio de la Historia Geográfica, Natural y Civil del Reyno de Chile (Primera Parte)*. (Madrid: Antonio de Sancha, LXXXVIII): 47-52. Sobre el uso de aguas termales en la colonia en la región, Carl Bribdenbaugh, “Baths and Watering Places of Colonial America”. *The William and Mary Quarterly*, Third Series, Vol. 3, No. 2 (Apr., 1946): 151-181.

Durante este tiempo Cauquenes cambió, tanto en su materialidad como en su representación. La hidroterapia complementó la lectura de los baños y otorgó un respaldo disciplinar a las apreciaciones que se tenían sobre sus propiedades. Los chorros y brotes de agua y gas, que emanaban con distintas formas y temperaturas de la tierra, fueron leídos desde su potencial curativo. Con ello, las montañas “empastadas de minerales”, los volcanes y sus planicies pudieron comenzar a ser vistas como fuentes de salud, lo que respaldó conceptualmente la introducción de nuevas y creativas curas para tratar enfermedades crónicas o agudas en esos espacios, junto a un riguroso régimen determinado por la espacialidad del establecimiento termal.¹⁷ Como consecuencia, las antiguas chozas o ranchos construidos en las primeras décadas de la República —reproducidas por el médico británico James Paroissien en su viaje a las termas en la década de 1820 (Figura 9)—, que habían servido para acoger a los enfermos viajeros, comenzaron a ser reemplazadas hacia 1860 por un atractivo hotel que buscó habitar y poblar el espacio.



Figura 9. James Paroissien, Baños de Cauquenes. Litografía publicada por Peter Schmidt-meyer, *Travels into Chile, over the Andes, in the year 1820 and 1821*, Londres, LHRO&G, 1824.

¹⁷ Karl E. Wood, *Health and Hazard. Spa Culture and the Social History of Medicine in the Nineteenth Century*. Cambridge: Cambridge Scholars Publishing: 2012): 78-79, y Scheid et al. *Le thermalisme: Approches historiques et archéologiques d'un phénomène culturel et medical* (Paris, CNRS Éditions, 2015).

Para 1870 ya se contaba en Cauquenes con un gran establecimiento, que — con sus restaurantes, cantina, salas de billar y de música, patios, parques y laguna — modificó sustantivamente la práctica termal y, asociado a ella, la experiencia científica de los naturalistas que acudían a la montaña y tenían como paso obligado — y deseado — a estos baños. Esta infraestructura impulsó nuevos modos de reproducir el paisaje, como el plano en el que se definieron ángulos de visión, encuadre y composición de los baños no aplicados con anterioridad, como da cuenta el *Plano del Establecimiento Termal. Baños de Cauquenes*, publicado en una guía de fines del siglo XIX (Figuras 10 y 11).

Las aguas termales fueron domesticadas, intervenidas y calibradas en función de su uso terapéutico y de su posicionamiento en el mercado médico de fines del siglo XIX. Los pozones se transformaron en elegantes tinas de mármol de Carrara que ocultaron el manantial y al escenario que los albergaba. Este último fue convertido en un celebrado salón de baños, de estilo neogótico, con cuartos coronados con los retratos de profesores y médicos europeos, desde Josef Škoda (1805-1881) a Rudolf Virchow (1821-1902). Las efigies galenas representaban la autoridad de la medicina académica sobre este sitio, al mismo tiempo que revelaban el peso del imaginario termal europeo sobre los baños nacionales. Cauquenes fue leído y representado desde los spas franceses y alemanes, y sus regentes comparados con sus pares mediterráneos, como sucedió con Karl Hess, aquel “apuesto alemán” que según el viajero Thomas Woodbine, poco tenía que envidiar a su tocayo de los Pirineos.¹⁸

Así, a la mirada naturalista que vio en el escenario natural de Cauquenes un espacio de ciencia, se sumó la mirada médica, que vio un reducto de salud, caracterizado no solo por sus aguas, sino por el establecimiento que en él se había levantado y el dinamismo que imprimían sus numerosos visitantes. Desde esta perspectiva, la imaginación termal se nutrió ya no solo del agua que brotaba de la tierra, de su temperatura y de sus componentes, sino de la sociedad que sobre ella se había levantado.

Para 1880 se contabilizaban en Chile al menos diez establecimientos de baños termales — como Apoquindo, Colina, Panimávida, Quinamávida y Chillán, entre otros — los que recibían en temporada estival una cantidad de visitantes que fluctuaba entre 2000 y 5000 personas. En este contexto, el análisis cobró fuerza como signo identitario del establecimiento, pero ya no solo en función de los criterios naturalistas, sino más bien de los nuevos paisajes que ayudaron a conformar, destinados a visibilizar y posicionar a Cauquenes y la calidad de su régimen curativo, en el mercado médico nacional.

¹⁸ Thomas Woodbine Hinchliff, *Over the Sea and Far Away. Being a Narrative of Wanderings round the World* (Londres, Longmans, Green and Co., 1876): 112.



Figura 10. Fotografía publicada en la *Guía de Bañista y del Turista*, de Primitivo Espejo. Santiago, 1897.



Figura 11. Plano publicado en la *Guía de Bañista y del Turista*, de Primitivo Espejo. Santiago, 1897

El estudio del agua termal, apoyado principalmente por la química y luego, hacia fines del siglo XIX, por la bacteriología, imprimió nuevos significados a los baños y a sus espacios, reforzando su carácter médico, prístino y puro. La química se enfocó en el conocimiento de los componentes de las aguas, destacando sus cualidades medicinales. La bacteriología, en cambio, contribuyó a cimentar la relación entre suciedad y enfermedad, sincretizando las nuevas ideas de Koch sobre los gérmenes con las antiguas teorías miasmáticas, y fue particularmente útil para recordar tanto el escenario prístino que ofrecían estos parajes como para posicionar el agua embotellada termal en el país como uno de los elementos de consumo más sanos y puros del mercado, proyectando el paisaje de las termas a horizontes mucho más amplios.

Los primeros análisis de las aguas termales comenzaron a ser realizados por naturalistas a fines del siglo XVIII, sumándose en las siguientes décadas nuevos actores, como médicos, farmacéuticos, químicos y empresarios termales, que complementaron este ejercicio de transformación del agua, mediado por el laboratorio, en un elemento científico y posteriormente, transable en el mercado terapéutico.¹⁹

El análisis de las aguas termales fue un asunto relevante y frecuente, que permitió la atribución de características específicas a ciertas aguas en pos de su posicionamiento en el mercado. Como explicaba Domeyko:

*[...] raro es el año en que no ocurran de varias partes de la República al laboratorio, los hacendados, los campesinos, con botellas de agua, exigiendo que se les conteste llana i positivamente si las que traen son minerales, si son activas, i si son mejores que las que se conocen hasta ahora.*²⁰

Como resultado de estos esfuerzos, los baños de Cauquenes fueron presentados, primero, como un espacio de ciencia, cuyas aguas termales tenían particularidades químicas diferenciadoras. El análisis permitió asignarles una identidad clorurada-clásica que fue usada como carta de presentación y de singularidad, que asimiló los baños con los de Kreuznach y Nauheim en Alemania, de Castio Caro en Italia, y de La Motte en Francia, pero que también le permitió decir que “en ninguna parte del mundo” se encontraban termas de similares condiciones, y que sus pares europeos no podían competir, “ni el alto grado de mineralización ni en el de termalidad”, con sus aguas.²¹

El análisis permitió, en segundo lugar, presentar a Cauquenes como un sitio terapéutico de importancia, con aguas capaces de administrar todas

¹⁹ Carlos Sanhueza, *Geografía en acción. Práctica disciplinaria de Hans Steffën en Chile (1889-1913)*. (Santiago: Editorial Sudamericana, 2014): 17.

²⁰ Ignacio Domeyko, “Hidrología. Estudio sobre las aguas minerales de Chile, por don Ignacio Domeyko, rector de la Universidad”. *Anales de la Universidad de Chile*, tomo 39 (1871): 221-283, 221.

²¹ Primitivo Espejo. *Guía del Bañista y del Turista*. (Santiago, 1897): 80

aquellas dolencias que el avance de la civilización imprimía en los cuerpos y en las mentes. Los médicos, como voces autorizadas, tomaron los resultados de los análisis químicos y los complementaron con sus análisis clínicos, lo que les permitió configurar diagnósticos y ofrecer prognosis para una variedad de cuadros patológicos. En este sentido, el análisis le dio contenido y especificidad a la cura termal, pues vinculó el sustrato científico del laboratorio con los resultados médicos prometidos por los baños. Así, el análisis representó un esfuerzo individual, ideológico y económico, que fue más allá de la persuasión científica por comprender y descifrar el mundo natural, abarcando los dividendos de la gestión del viajero europeo, la necesidad de legitimar la identidad profesional de químicos y médicos, y de entregar un respaldo comercial al espacio termal, entre otros.²²

En Cauquenes se conformó un imaginario sustentado en la capacidad de su paisaje de afectar a la población, en el sentido tanto de curar o paliar los dolores de los enfermos, como de apoyar a todos quienes estaban en riesgo de sucumbir a las enfermedades que les presentaba la vida urbana y moderna. Esta condición de su paisaje se expresaba en su presentación ya no solo como un sitio termal, sino como un régimen anclado en nuevos elementos materiales que reflejaba las normas de conducta y de civilidad asociadas al modelo curativo, y a las que se le atribuía la capacidad de regenerar el cuerpo, la mente y el ánimo.

En consecuencia, el escenario termal se caracterizó y representó ya no solo en función de sus aguas y sus medidas, sino también a través de los valores y símbolos que reforzaban sus atributos y que eran constituyentes de sus elementos científicos. De ahí que su representación considerara también a los jardines, parques, fuentes, puentes colgantes, salas de billar, restaurant y capilla, como integrantes de una ideología científica anclada en la tradición católica y en la sociabilidad burguesa que cruzaba el entendimiento de la salud y de las medicinas. Esta alianza fue relevante en tanto propuso paisajes atravesados por los ordenamientos sexuales del espacio y tiempo urbanos, y en consecuencia, por las actividades que la medicina permitía al cuerpo enfermo en dichos espacios.

La prensa y su publicidad incorporaron estos contenidos desde temprano. Esto permitió traducir y redirigir el discurso científico, así como los análisis y mediciones, hacia públicos más amplios, y enriquecer su mensaje con nuevos actores. Así, la publicidad pagada por administradores como Hess o Primitivo Espejo apuntó siempre a relevar el dato científico que aportaban los análisis y complementarlo con la presentación del régimen. “Según comunicaciones recibidas últimamente de sabios naturalistas” de Alemania —señalaría un aviso publicado en *El Ferrocarril* hacia 1864—, solo dos

²² George Levine, “Defining Knowledge: An Introduction”, en *Victorian Science in Context*, de Bernard Lightman. (Chicago, The University of Chicago Press, 1997): 15-23.

de los más afamados establecimientos de baños de Alemania podían compararse con las cualidades de Cauquenes.²³ “Según los principales médicos de Santiago y Valparaíso” —informaría otro aviso—, en Cauquenes se curaba el “reumatismo, dolores nerviosos, catarros y constipados crónicos, asma, bronquitis crónica, dispepsia (debilidad del estómago), úlceras del estómago e intestinos, afecciones crónicas del hígado, cálculo urinario, esterilidad, herpes (empeines), flato, sífilis, cáncer, úlceras exteriores, principios de parálisis, enfermedades de los riñones i de la vejiga, desarreglo de la menstruación, debilidad a consecuencia de excesos sensuales”, y las más diversas afecciones.²⁴

A la nosología patológica se sumó la presentación del sistema termal, aquellas dinámicas especiales, cotidianas, que daban un tono especial al lugar, marcado por las reglas y pautas que permitía y proponía el régimen.

Para fines del siglo XIX e inicios del XX, la ciencia termal se articuló estrechamente con el mercado y, en conjunto, construyeron nuevos imaginarios que mantuvieron vigente a Cauquenes como sitio de ciencia y de salud hasta mediados del siglo XX, cuando los cambios en materia terapéutica, con la difusión de los antibióticos, comenzaron a componer nuevos paisajes vacacionales, que alejaron a los baños de la medicina y los acercaron al turismo.

5. Los géiseres del Tatio: imaginando un futuro geotérmico

Si bien la composición de un paisaje geotérmico —desde la producción científica y a una escala nacional en el territorio chileno— se encuentra atravesada por el lugar del volcán en las descripciones naturalistas, o la visibilización de los baños termales como espacios de sanación; los géiseres del Tatio gatillaron de una manera diferente la imaginación geotérmica: se trata del primer escenario donde se imaginó utilizar fenómenos geológicos como fuente de electricidad.

Las primeras exploraciones con un foco exclusivamente geotérmico en Chile comenzaron en la década de los años veinte del siglo XX, realizadas por miembros de la colonia italiana de Antofagasta, quienes crearon la sociedad privada Comunidad de El Tatio. El principal interés de estas expediciones fue estudiar los potenciales geotérmicos para proveer de energía eléctrica al desarrollo de la industria minera. Su agenda científica estuvo marcada por traer conocimientos científicos y técnicos desde Larderello (sitio ubicado en la Toscana italiana) hacia las zonas del Tatio en el alto Loa. El trabajo consistió, entre otras tareas, en exploraciones por medio de perforaciones realizadas a partir de 1921,²⁵ estableciendo una primera aproximación al potencial geotérmico de la zona, lo que ha sido señalado

²³ “Baños de Cauquenes”, *El Ferrocarril*, 13 de diciembre de 1864.

²⁴ “Baños de Cauquenes”, *El Ferrocarril*, 13 de diciembre de 1864.

²⁵ Ettore Tocchi, *Il Tatio, Ufficio Geológico Larderello SpA*. Informe inédito, 1923.

como un trabajo pionero para la geotermia en Chile.²⁶ Como registro de esta exploración queda el informe inédito redactado por Ettore Tocchi, “Ufficio Geológico Larderello SpA”, de 1923.

Estas exploraciones también fueron descritas por Juan Brügger (1887-1953), geólogo alemán pionero en la formación de la disciplina en Chile, fruto de observaciones realizadas durante trabajo de terreno en el Tatio entre 1929 y 1940 (Figura 12). En su informe geológico, cuenta que

[...] hace unos 20 años la región de los geisers fue visitada por numerosos ingenieros con el fin de aprovechar la energía técnica de los vapores. Como reconocimiento se hizo un sondaje de 50 mts. Del cual sale todavía hoy día un fuerte chorro de agua y vapor.²⁷

Figura 12. Fotografía tomada por Juan Brügger, publicada en Informe geológico sobre el agua subterránea de la región de Calama. *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile*, 30, 4: 214-231, Santiago.



La imaginación geotérmica de estas exploraciones tuvo como foco específico el vapor. Buscando medir y volverlo un objeto de estudio, el vapor fue fuente de imaginación y curiosidad. Frente a las incógnitas de las erupciones de los géiseres, las descripciones científicas se caracterizaron por intentar explicar las fuentes del calor y las trayectorias del agua. Las imágenes de volcanes y aguas termales, desde el Tatio fueron leídas desde vapor fluyendo en el aire.

La realización de estudios geotérmicos en El Tatio se encuentra atravesada por la experiencia de la altura, la distancia y las dificultades de las exploraciones para llegar a este sitio. Pero, por otro lado, el escenario de las emanaciones de vapor tuvo un rol central en la imaginación y posibilidad tecnológica de utilizar industrialmente el potencial energético. Se trata de una atracción visual mediada por el desarrollo tecnológico y el interés del poder vital de las máquinas para transportar las fuerzas de la naturaleza.

²⁶ Diego Morata, “¿Chile: un país geotérmico en un futuro inmediato?”, *Anales de la Universidad de Chile* 2014; 71-86. Alfredo Lahsen, Fabián Sepúlveda, Juan Rojas y Carlos Palacios, “Present Status of Geothermal Exploration in Chile”, en *Proceedings World Geothermal Congress*, Antalya, Turkey, 2005.

²⁷ Juan Brügger, *Informe geológico sobre los géiseres Volcanes del Tatio*, Ministerio de Fomento, Departamento de Minas y Petróleo. Informe inédito, 1940: 4.

Desde esta perspectiva, las observaciones y mediciones se focalizaron en la presión con la que el vapor emerge del interior de la Tierra, y uno de los intereses geológicos que cautivó la atención durante estas exploraciones fue la intermitencia de los géiseres del Tatio, específicamente el hecho de que la erupción de los géiseres varíe según las horas del día. Este interés, presente también en los pioneros italianos, se enmarca en el esfuerzo por proveer de una energía continua y eléctrica a las industrias de la provincia.

Desde un punto de vista económico, estas expediciones de comienzo de los años 20 buscaban una fuente de electricidad para aportar a la minería y los desarrollos industriales de la región, pero la intermitencia de los géiseres del Tatio fue considerada como un problema, que incluso angustió a los pioneros italianos al notar la ausencia del fenómeno en determinadas horas del día. Este desafío volvió la intermitencia del vapor un problema científico a ser comprendido desde la observación geológica del paisaje, pero también nace con una continua comparación con Larderello, pues los comienzos de la imaginación de la energía geotérmica en Chile surgen al observar el Tatio desde los lentes del paisaje de la Toscana italiana.

Siguiendo los progresos realizados por el príncipe Piero Ginori Conti en 1904, al lograr usar el vapor como fuente de energía para la producción de electricidad,²⁸ Larderello se convirtió en un referente mundial en el desarrollo de la energía geotérmica. Por esta razón, la sociedad del Tatio contrató los servicios de ingenieros italianos de esa zona para venir a Chile a estudiar y explorar esta energía. En el informe pionero de Tocchi,²⁹ se menciona que se utilizan las mismas prácticas que en Larderello para medir el vapor. Condensan el vapor natural obtenido del orificio de la surgencia en un serpentín de cobre, estañado internamente, para medir la temperatura y la presión ambiente. Conocer la temperatura, la presión, y la cantidad de agua era fundamental para saber si era posible o no transformar el vapor en energía. Pero además del conocimiento geológico, la manera directa y fundamental de conocer esta energía fue perforando y alcanzando la fuente de vapor constante.

No sólo conocimientos científicos llegaron desde Larderello, sino que el paisaje geológico de El Tatio fue sistemáticamente comparado con las características del lugar en los informes científicos de la época. En el informe de Tocchi de 1923 se establece que “la extensión del terreno activo del Tatio es, al menos 5 veces superior a *la de Larderello*”.³⁰ La manera en que se piensa, evalúa y negocian los potenciales geotérmicos, es echando mano a los conocimientos tecnológicos y las imágenes del fenómeno geológico que se produce en esta región italiana.

²⁸ Raffaele Cataldi, Susan F. Hodgson y John W. Lund, *Stories from a Heated Earth, Our Geothermal Heritage*. (Sacramento, California: Geothermal Resources Council, 1999).

²⁹ Tocchi, *Il Tatio, Ufficio Geológico Larderello SpA*, 1923.

³⁰ Tocchi, *Il Tatio, Ufficio Geológico Larderello SpA*, 1923: 29

La experiencia de terreno, midiendo y observando los potenciales geotérmicos del Tatio, fue atravesada por la intermitencia de las emanaciones de vapor. Convirtiéndose en uno de los principales desafíos científicos, alimentado por la comparación con las características geológicas de Larderello, la naturaleza del fenómeno geológico se volvió una incógnita. Pero a diferencia de las representaciones y la temporalidad geológica de los volcanes, el desafío se presenta en una escala de tiempo mucho menor: las horas del día. Durante las horas del día las erupciones cambian su frecuencia.

La presencia del vapor, y su sonido, inspiró los relatos de los ingenieros italianos, quienes con un interés industrial imaginaron en el paisaje del Tatio la presencia de máquinas con la capacidad de contener y transformar el vapor en energía eléctrica. La necesidad de una fuente constante de vapor, influyó sus maneras de entender el paisaje y soñar el desarrollo de la región por medio de un progreso contenido en el poder de las infraestructuras energéticas. Los tubos contenedores fueron descritos como una continuidad de la estética del vapor y la grandiosidad del paisaje. Pero las variaciones del fenómeno fueron vistas como un problema potencial.

En el geólogo Brügger podemos encontrar un especial interés por explicar y comprender estas variaciones. En sus reportes es posible encontrar una observación detenida de las características del paisaje para descubrir los misterios que el vapor del Tatio sugiere. Los cambios atmosféricos, el viento o la temperatura del agua son señalados como posibles factores. Pero su explicación final la encontró imaginando las profundidades del fenómeno. El geólogo desarrolló su hipótesis en base al encuentro entre las fuentes profundas de calor conectadas con los volcanes y las aguas subterráneas. El agua de las nieves, derretida desciende por las rocas permeables encontrándose con la masa de agua caliente, lava o rocas de temperatura elevada. El contacto entre el agua y el calor produce el vapor, el cual luego busca sus trayectorias para salir a la superficie. Las variaciones se explicarían por las diferencias de caudal durante las horas del día. La escala de sus observaciones geológicas se detiene en las variaciones del día.

La evidencia científica de los potenciales geotérmicos circuló, señalando registros de temperatura, frecuencia del agua, presión y composición geológica. Comprobando la similitud de las condiciones con Larderello, estos reportes tuvieron circulación nacional e internacional durante las siguientes décadas. A lo largo del siglo XX —y aún en las primeras décadas del XXI— se trata de una información que continúa gatillando la imaginación de futuros geotérmicos y componiendo paisajes geológicos, escenarios de una dinámica de reactivación y abandono de proyectos de producción de energía geotermal.

6. Reflexiones finales

Con este recorrido por tres escenarios geotérmicos de Chile, hemos querido resaltar la dimensión histórica y estética como parte constitutiva, aunque a veces un poco olvidada, de las ciencias. Los contextos que hemos relatado nos enseñan que los paisajes geotérmicos son algo más que

fenómenos observados a partir de principios estables: son resultado de la circulación de saberes, referencias y experiencias aportados por sujetos de diversas proveniencias, en interacción con las particulares condiciones de cada uno de los territorios señalados.

Al observar las interacciones entre naturalistas y montaña, en los contextos de algunas de las primeras exploraciones geológicas del territorio de Chile, hemos buscado avanzar en un entendimiento del paisaje como el concepto que sintetiza el cruce de temporalidades, experiencias en terreno, saberes locales y globales, historias del arte, de la cultura y de las ciencias. En nuestro estudio, buscamos evidenciar la capacidad que tienen los propios fenómenos geológicos para incidir en la composición de estas representaciones visuales y escritas que fueron inscribiéndolos como lugares de ciencias: las rocas del Antuco, las aguas termales de Cauquenes y el vapor de los géiseres del Tatio tienen un rol activo en la producción de paisajes geotérmicos en Chile.

Las imágenes del volcán Antuco manifiestan, como vimos, un cambio de paradigma científico de gran relevancia, que por un lado transformó la percepción temporal de una línea de desenvolvimiento constante a una dinámica de duración profunda que se moviliza a ritmos diferidos y que resulta de la interacción de agentes geológicos, pero también atmosféricos y biológicos. Validando las experiencias subjetivas como formas de conocimiento de la naturaleza, la incorporación de relatos personales de los naturalistas —que va desde las apreciaciones estéticas a la memoria de otros paisajes, desde las dificultades hasta la interacción con otros actores en terreno—, revela la persistencia de diferentes subjetividades en el proceso de producción del conocimiento científico.

Al observar los paisajes de los baños de Cauquenes, optamos por detenernos en la historia de las prácticas de medición sistemática de las propiedades de estas aguas minerales, paso inaugural de un proceso de transformación de este escenario andino hacia su domesticación como centro de ciencias, salud y turismo. Estas prácticas colaboraron en la conformación de un imaginario en torno a la capacidad del paisaje termal de afectar a la población en términos de cura y sanación, lo que no solo nutrió un mercado médico, como instauró un campo de divulgación científica a través de la prensa y de la publicidad de la época.

Los géiseres del Tatio son, por último, un escenario desde el que se imaginó la posibilidad de obtener energía eléctrica a través fenómenos geológicos a partir del vapor. Las propias características del fenómeno, la dificultad de su acceso, su intermitencia a lo largo de las horas del día, su almacenamiento, etc., plantearon incógnitas a quienes buscaron medir y plantear potenciales usos tecnológicos. Desde entonces, la medición de los géiseres continúa provocando la imaginación de un futuro geotermal, interrogando mediante la medición del vapor, la capacidad energética de las fuentes de calor profundo proveniente de los volcanes y de las aguas subterráneas.

La composición de los paisajes de Antuco, Cauquenes y del Tatio da cuenta de esfuerzos científicos de representación del territorio nacional, asociados a experiencias de descripción, medición e imaginación geológica, que configuraron desde comienzos de la República la representación del territorio nacional. Pero a su vez, esta composición sugiere que diversos actores que aportaron en estos procesos quedaron excluidos e invisibilizados.

Este estudio ha querido dejar en evidencia la ausencia de fuentes historiográficas que permitan recomponer la interacción que naturalistas provenientes de Europa, habilitados por las ciencias disciplinares para inscribir sus observaciones, sostuvieron con actores locales (arrieros, indígenas, naturalistas aficionados, etc.). Subrayar estas ausencias es otra forma de acceder a estos paisajes, puesto que, siguiendo los planteamientos de Steven Shapin, esto no solo visibiliza los aportes de intermediarios, asistentes y técnicos, sino que se vuelve fundamental a la hora de comprender la complejidad y diversidad de las prácticas de exploración y estudio de fenómenos geológicos en terreno.

Hemos visto que la composición de estos paisajes del Chile geotermal está atravesada por el diálogo entre geografías y culturas, manifestándose, en cada caso, la persistencia de las percepciones subjetivas de los agentes que interactúan e inscriben estos paisajes para la historia. Notamos así que la inscripción de emociones, sensibilidades, memorias y experiencias personales está presente en estos primeros relatos y que, con el paso del tiempo, comienza a ser eludida, hasta prácticamente desaparecer de los discursos científicos actuales, en los que se privilegia la encriptación de las observaciones según nomenclaturas disciplinares, con fronteras fijas que aspiran a estabilizar toda dimensión subjetiva del conocimiento científico.

Con este trabajo de alcance histórico, quisiéramos invitar a las nuevas generaciones de geólogos y geólogas a explorar los territorios activando esta dimensión subjetiva, a recuperar la tradición narrativa de los exploradores del pasado, a inscribir sus interacciones con agentes de otras culturas y disciplinas, a retomar la práctica del dibujo o fotografía en terreno, a inscribir sus impresiones para componer paisajes que sean elocuentes para el tiempo actual.

Atravesado por un contexto actual de destrucción, este tiempo requiere una mirada sensible al paisaje, atenta a condiciones sociales y ambientales que muchas veces exceden la descripción aislada de los fenómenos geológicos. Hoy, más que nunca, las historias de la naturaleza necesitan ser contadas de nuevas maneras. Desde esta perspectiva, la historia del paisaje geotermal nos invita a reincorporar la experiencia y la diversidad en los relatos de las ciencias.

CAPÍTULO II

Exploración geotérmica en Chile: qué sabemos y cómo aprendimos del potencial geotérmico

Diego Aravena, Mauricio Muñoz Morales y Diego Morata

1. Introducción

Chile se ubica en un contexto geológico muy peculiar. En una franja relativamente estrecha de tierra se conjugan un alzamiento continuo de la cordillera de los Andes, la ocurrencia de algunos de los mayores yacimientos metalíferos del mundo, megaterremotos, tsunamis, erupciones volcánicas y campos geotermiales. Eventos que se desatan debido a fuerzas de envergadura planetaria, reflejo de una cantidad inmensa de energía. Como consecuencia de esta configuración geológica, Chile posee un territorio dotado con un amplio rango de recursos: solares, mareomotrices, eólicos y geotermiales.

En este capítulo relataremos la investigación que derivó en la Tectónica de Placas, motor de la actividad volcánica andina. Explicaremos cómo se forma un sistema geotermal y cómo se aprovecha para generar electricidad. Mostraremos cómo nació este concepto y cómo se ha adaptado para describir la cantidad de energía disponible en el subsuelo, inicialmente para generación eléctrica y, en la actualidad, para describir también el potencial de usos directos de la geotermia, como climatización de viviendas y procesos productivos.

Para esto, presentaremos un relato documentado de cómo se ha desarrollado la exploración geotermal en Chile desde mediados del siglo XIX. Revisaremos las metodologías que han utilizado diversos autores para caracterizar los recursos geotérmicos y discutiremos respecto a cómo han evolucionado las conclusiones que se pueden obtener de estos datos. Todo a la luz del conocimiento geológico de cada época.

2. Tectónica de Placas, volcanes y recurso geotermal

En Chile, el concepto de **recurso geotermal** está fuertemente ligado a la existencia de los volcanes, que son la principal (más no la única) fuente de calor geotermal a lo largo de la cordillera de los Andes.

En los Andes chilenos existen cientos de volcanes considerados activos, es decir, que han tenido erupciones en los últimos 10.000 años, un parpadeo en tiempo geológico. Los volcanes llevan allí mucho tiempo, pero nuestro entendimiento respecto a su origen ha cambiado de la mano del desarrollo de una de las teorías más importantes en la historia de la geolo-

gía: la **Tectónica de Placas**. A continuación, describiremos brevemente el desarrollo de esta teoría en cuatro hitos:

- a. En 1929, un geofísico-meteorólogo llamado Alfred Wegener propuso la hipótesis conocida como **deriva continental**, que plantea que los continentes se desplazan en tiempos geológicos. Similitudes en la paleontología y litología en las costas a ambos lados del Atlántico y el ajuste de rompecabezas de los continentes eran evidencias muy sugerentes, aunque aún circunstanciales, pues no se conocía ningún mecanismo que explicase este movimiento de masas.
- b. A mediados de la década de 1950 se formalizó el modelo de formación simétrica de suelo oceánico a lo largo de las **dorsales oceánicas**, enormes sistemas de fracturas que atraviesan todo el planeta y donde se formaría el suelo oceánico.¹
- c. A comienzos de los años 60 fue posible medir el magnetismo de las rocas del suelo oceánico. Esta capacidad permitió develar un patrón de bandas magnéticas que confirman la extensión del suelo oceánico.²
- d. Por último, la demostración de que las placas tectónicas pueden ser consideradas como “rígidas” permitió cuantificar su movimiento e inferir procesos geológicos asociados a los desplazamientos relativos entre placas;³ como la **subducción de placas**, fenómeno donde una placa tectónica colisiona y se sumerge debajo de otra.

Lo que sabemos entonces es que la capa externa del planeta, la corteza, está dividida en varias placas rígidas que tienen aproximadamente 100 km de espesor (se le llama la litósfera a esta capa rígida externa de la Tierra, compuesta por la corteza y la parte superior del manto). Bajo la corteza se ubica el manto, y dentro de éste existe un nivel en donde la existencia de un pequeño porcentaje de material fundido permite el desplazamiento de las placas tectónicas, desplazándose a una velocidad de unos pocos metros cada 1.000 años. No es de extrañar que nos haya tomado tanto tiempo descifrar este puzle (Figura 1).

Tras toda la evidencia planteada, recién a comienzos de la década de 1970 se explican de manera unificada fenómenos como erupciones volcánicas, terremotos y la formación de las cordilleras. En Chile, eminentes geólogos que se titularon antes de la completa aceptación de la Tectónica de Placas aún realizan clases; Francisco Hervé, Ricardo Thiele, Reynaldo

¹ Maurice Ewing y Frank Press, “Geophysical contrasts between continents and ocean basins”, *GSA Special Papers* (1955); Robert Dietz, “Continent and ocean evolution by spreading of the sea-floor”, *Nature* 190 (1961): 854-857; Harry Hess, “History of the ocean basins, In Petrologic Studies”, *Buddington Memorial* (1962)

² Frederick Vine y Drummond Matthews, “Magnetic anomalies over oceanic ridges”, *Nature* 199 (1963): pp.947-949.

³ Dan McKenzie y Robert Parker, “The North Pacific: an example of tectonics on a sphere”, *Nature* 216 (1967): 1276-1280.

Charrier y Alfredo Lahsen Azar[†], entre otros. Ellos se formaron leyendo conclusiones que aludían al “geosinclinal andino”,⁴ escritas por leyendas de la geología en Chile, como Luis Aguirre Le-Bert, Mario Vergara, Jorge Muñoz Cristi y Humberto Fuenzalida Villegas.

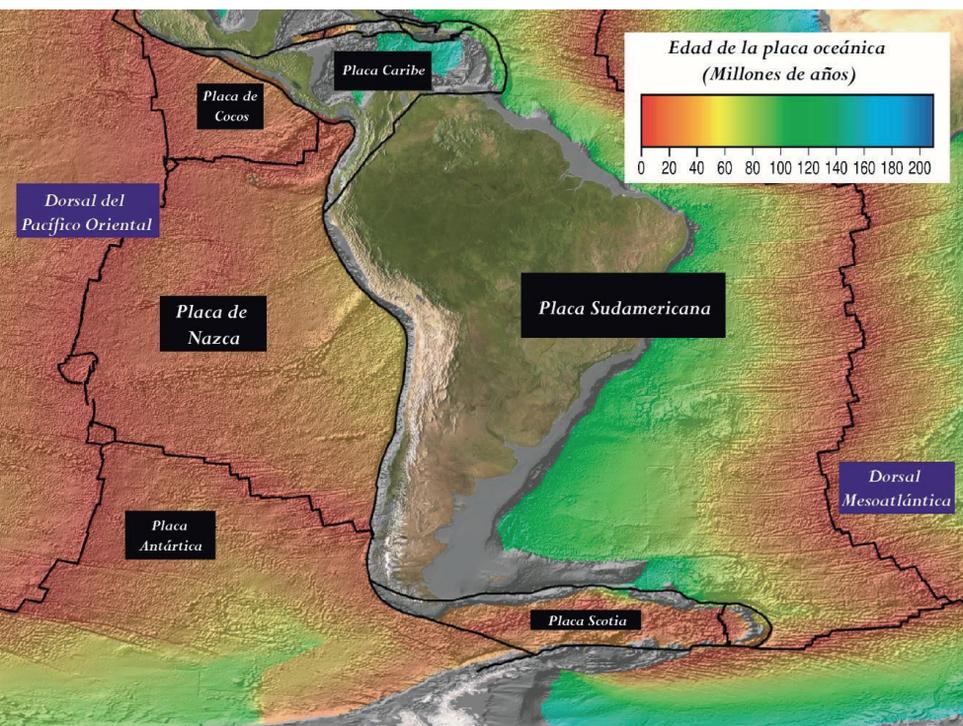


Figura 1. Placas tectónicas en torno a los Andes en Sudamérica. Placas de Nazca, Sudamericana y Antártida (modificado de Lim 2008, CIRES & NOAA/NCEI).

En la actualidad sabemos que en el margen occidental de Sudamérica, la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana ha prevalecido durante, al menos, los últimos 180 millones de años.⁵ Es esta configuración de placas tectónicas la que dio origen a la formación y alzamiento de los Andes; junto con toda su actividad sísmica, volcánica, mineral y geotermal. Los modelos iniciales del contacto de placas a lo largo del margen andino fueron enormemente enriquecidas con el trabajo de geólogos chilenos como Luis Aguirre, Reynaldo Charrier, Constantino Mpodozis y

⁴ Óscar González Ferrán y Mario Martínez, “Reconocimiento geológico de la Cordillera de los Andes entre los paralelos 35 y 38 sur”, *Anales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas* (Vol. 19, No. 19 (agosto 1962: 19).

⁵ David E. James, “Plate tectonic model for the evolution of the Central Andes”, *Geological Society of America Bulletin* 82 (1971): 3325-3346; Richard Sillitoe, “Tectonic segmentation of the Andes: implications for magmatism and metallogeny”, *Nature* 250 (1974): 542-545; Yi-Wei Chen et al., “Southward propagation of Nazca subduction along the Andes”, *Nature* 565 (2019): 441-447.

Francisco Hervé, entre otros.⁶

Cuando la placa de Nazca se hunde bajo la placa Sudamericana y alcanza una profundidad de aproximadamente 150 km, los minerales que ésta contiene cambian su estructura molecular, liberan agua y desencadenan un proceso de fusión del manto y formación de **magma**; una combinación de roca fundida, cristales y gases con temperaturas que van de 800 °C a 1200 °C. Tras este proceso de formación, el magma asciende lentamente a través de la corteza y se acumula en su interior, en lo que comúnmente se denomina **cámara magmática**: la gran fuente de energía geotermal en los Andes chilenos. Nuestro entendimiento contemporáneo de las cámaras magmáticas se ha visto enriquecido fuertemente con el trabajo de geólogos especializados en magmatismo y volcanismo como Alfredo Lahsen Azar†, Miguel Ángel Parada y Diego Morata Céspedes; tres miembros fundadores, y el actual director del CEGA.⁷ La academia en Chile entendió de manera temprana el potencial energético de los Andes.

Las cámaras magmáticas son las responsables de la existencia de grandes volcanes en la superficie. Cuando ocurre una erupción, el magma llega a la superficie y se separa en enormes volúmenes de sus distintos componentes; gases, ceniza, rocas incandescentes y lava. La lava se acumula y fluye siguiendo la pendiente, grandes bloques de roca caen por doquier y durante horas, días o semanas llueve ceniza que cubre todo y envenena los cursos de agua. Una sola erupción es capaz de generar kilómetros cúbicos de material, cientos de erupciones dan forma a los **estratovolcanes**, gigantes que se formaron, capa tras capa, a lo largo de cientos de miles de años en los Andes chilenos. En esta categoría, los volcanes más conocidos son el Nevados de Chillán, el Antuco y el Rucapillán (volcán Villarrica).

Ahora es cuando entra en la historia el agua superficial,⁸ elemento que comienza un viaje para transformarse en vapor y agua geotermal. Como se mencionó antes, una cámara magmática emplazada a poca profundidad es una enorme fuente de energía capaz de calentar las rocas circundantes a temperaturas de varios cientos de grados. Cuando el agua superficial penetra en las fracturas que poseen las rocas, logra llegar a profundidades

⁶ Por ejemplo, Reynaldo Charrier, "Interruptions of spreading and the compressive tectonic phases of the Meridional Andes", *Earth and Planetary Science Letters* 20 (1973): 242-249; Luis Aguirre et al., "Andean Magmatism: its paleogeographic and structural setting in the central part (30°-35° S) of the Southern Andes", *Pacific Geol.* 8 (1974): 38; Francisco Hervé et al., "Late Paleozoic K/Ar ages of blueschists from Pichilemu, central Chile", *Earth and Planetary Science Letters* 23 (1974): 261-264; Constantino Mpodozis y Randall Forsythe, "Stratigraphy and geochemistry of accreted fragments of the ancestral Pacific floor in southern South America", *Palaogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 41 (1983): 103-124. Estanislao Godoy, "Sobre la discordancia intrasenoniana y el origen de los depósitos de caolín de Montenegro, Región Metropolitana, Chile" En Congreso Geológico Argentino, 8., San Luis (20-26 septiembre 1981): 733-741

⁷ Alfredo Lahsen, "La actividad geotermal y sus relaciones con la tectónica y el volcanismo en el norte de Chile", En Primer Congreso Geológico Chileno (2-7 de agosto 1976), Santiago; Diego Morata et al., "Crustal contribution in the genesis of the bimodal Triassic volcanism from the Coastal Range, central Chile", *Revista geológica de Chile* 27 (2000): 83-98; Diego Morata et al., "The Lower Cretaceous volcanism in the Coastal Range of central Chile: geochronology and isotopic geochemistry", *Revista geológica de Chile* 35 (2001).

⁸ Lluvia, nieve, agua de mar, etc.

kilométricas, donde se calienta al contacto con las rocas calientes, alcanzando temperaturas de hasta 400 °C. Durante todo este proceso de descenso y calentamiento, el agua cambia su composición química y puede considerarse como **agua geotermal**. El agua geotermal, al estar caliente, tiende a viajar hacia la superficie y a veces se acumula en sitios conocidos como **reservorios geotermales** (Figura 2), grandes volúmenes de agua y roca caliente que sirven como fuente de energía limpia y renovable. A diferencia del petróleo o el gas, los reservorios geotermales son dinámicos, con recarga y descarga de fluidos constantemente. Los géiseres y las surgencias termales son algunos ejemplos de lo que sucede cuando parte de los fluidos del reservorio alcanzan la superficie (Figura 2).

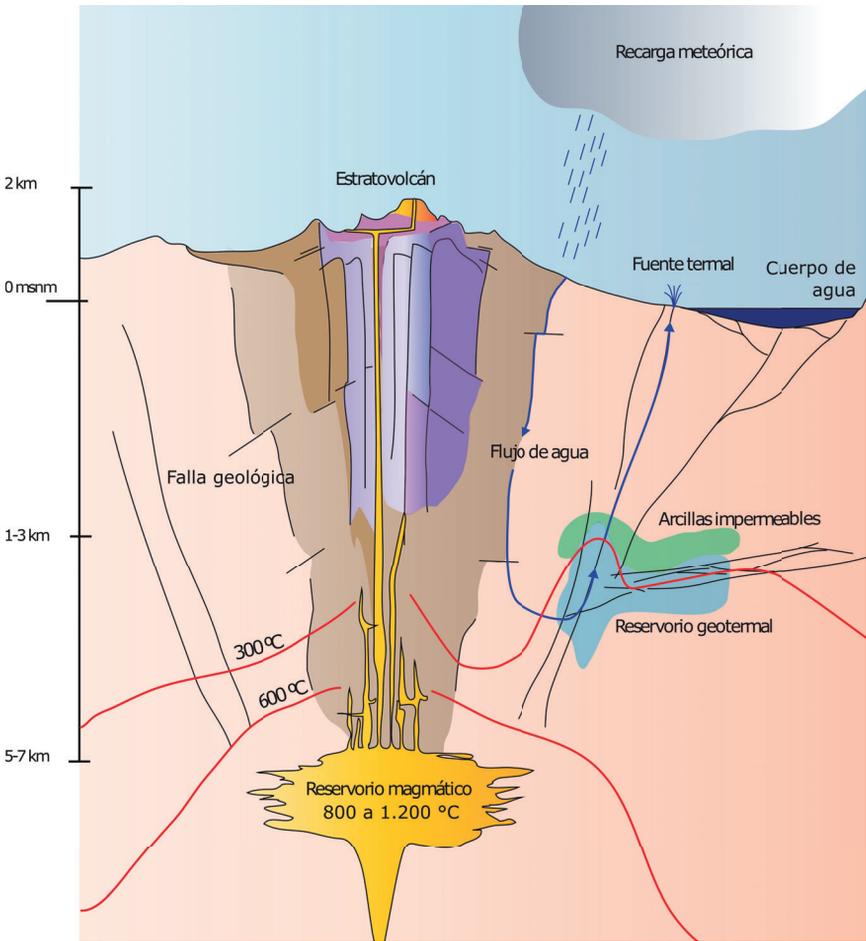


Figura 2. Modelo conceptual de un sistema geotermal asociado a volcanismo activo (elaboración propia).

No es fácil que se forme un reservorio geotermal. Se requiere una fuente de calor, la ocurrencia de grandes fallas geológicas y agua suficiente que penetre a través de ellas. Es por eso que Chile es un país particularmente favorecido, ya que posee la conjugación de todos los factores necesarios para la formación de reservorios geotermiales.

¿Cómo se aprovecha un reservorio geotermal?

Si se logra perforar hasta la profundidad donde se ubica el reservorio geotermal, entonces se cuenta con un **pozo de producción**. En la superficie, en la boca del pozo de producción, sale expulsada una mezcla de agua y vapor geotermal a gran presión. El vapor geotermal es canalizado por tuberías y conducido hasta una turbina, la que al girar es capaz de mover un generador eléctrico (Figura 3). A diferencia del vapor, la fase líquida no serviría, en principio, para generar electricidad y generalmente se reinyecta de vuelta al reservorio, donde se volverá a calentar (y pasará a ser parte del reservorio).

El mecanismo explicado anteriormente es la forma como se genera más energía geotermal en el mundo y se llama comúnmente **planta de flasheo**. Sin embargo, esta no es la única forma de generación eléctrica geotermal. En la planta Cerro Pabellón, en Chile, el diseño de planta geotermal que se implementó corresponde a lo que se llama **plantas binarias**. En este tipo de plantas, el fluido geotermal caliente se utiliza para calentar lo que se conoce como el fluido de trabajo, el que es vaporizado por el efecto termal del fluido geotermal en un intercambiador de calor. Este vapor procedente del **fluido de trabajo** es el que se hará pasar a la turbina, la que, al igual que en el caso anterior, al girar a altas velocidades será capaz de mover un generador eléctrico. Este tipo de plantas se llaman plantas binarias debido a que trabajan con dos fluidos: el fluido geotermal procedente del reservorio y el fluido de trabajo que, por medio de un circuito cerrado, será el que permita hacer girar la turbina (Figura 3).

Gran parte de los conceptos utilizados para describir materiales de valor ubicados en el subsuelo tienen su origen en la industria minera, lo que tiene cierto sentido, pues una gran cantidad de recursos minerales se forman por el ascenso de fluidos desde grandes profundidades, fenómeno que, como ya explicamos, ocurre de manera muy eficiente en los contactos de placas. El gran motor de la subducción es la causa tanto de los grandes yacimientos minerales como del gran potencial geotermal en Chile. En el caso de la minería, los fluidos profundos transportan elementos valiosos que precipitan en la forma de minerales, proceso que ocurre a lo largo de miles a millones de años. En el caso de la geotermia, el recurso es el fluido en sí mismo que actúa como medio de transporte del calor desde las rocas.

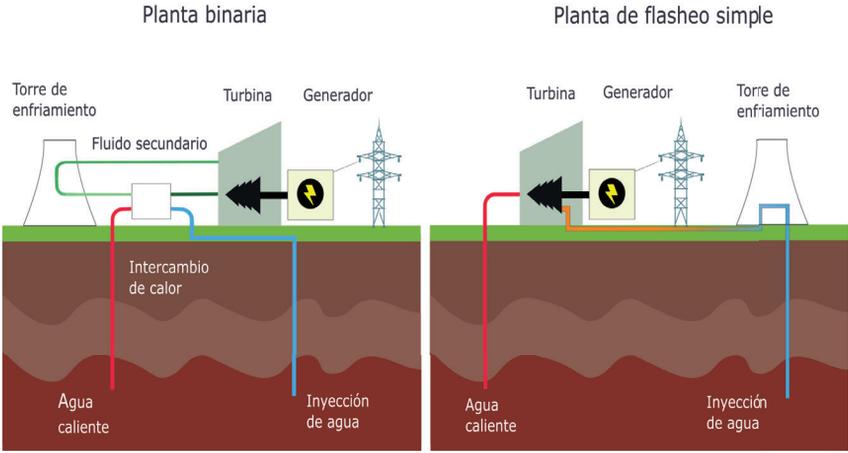


Figura 3. Esquema de utilización de fluidos geotermales para la generación eléctrica mediante: A) planta binaria y B) planta de flasheo (elaboración propia).



Figura 4. Plantas geotermales de generación eléctrica en el mundo. Es notoria la correlación de potencial geotermal con el Anillo de Fuego del Pacífico (modificado de think-geothermal.com).

Estas similitudes generan una tendencia a aplicar ciertos términos propios de la actividad minera a la energía geotérmica. Los trabajos de White & Williams y Muffler & Cataldi⁹ son ejemplo de ello, pues adaptaron conceptos utilizados en la exploración minera y sentaron las bases de la terminología utilizada actualmente para definir la energía geotermal disponible para la generación de electricidad:

*“El recurso geotermal base es la energía contenida en la corteza terrestre, bajo un área determinada y a una profundidad determinada”.*¹⁰

Esta definición fue refinada para diferenciar los recursos que pueden ser alcanzados mediante perforación de los que no, llamados recurso base accesible e inaccesible, respectivamente. A su vez, solo una parte del recurso base accesible es utilizable, aquel que puede ser extraído a costos competitivos con otras formas de energía (Figura 5). Nuevamente se están usando conceptos adaptados desde la minería.

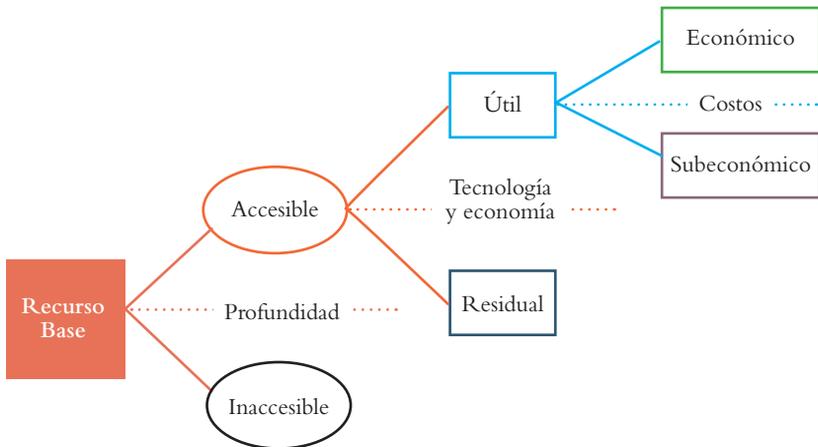


Figura 5. Subdivisiones del recurso geotermal base en función de profundidad, tecnología y costos (modificado de Muffler y Cataldi, 1978).

El último gran legado de la terminología minera corresponde a los conceptos de recurso inferido, recurso indicado y recurso medido. Estos términos se refieren al grado de confiabilidad en los datos disponibles: si se mide el caudal de vapor en la boca del pozo de producción, ese caudal equivale a una cantidad de energía que se considera medida y tiene un alto grado de certeza. Por el contrario, si se está estimando la cantidad de

⁹ Donald Edward White y David Williams, “Assessment of geothermal resources of the United States, 1975” (No. 726-730), US Department of the Interior, Geological Survey, 1975; L. J. P. Muffler y Raffaele Cataldi, “Methods for regional assessment of geothermal resources”, *Geothermics* 7 (1978): 53-89.

¹⁰ Modificado de: Donald Edward White y David Williams, “Assessment of geothermal resources of the United States, 1975” (No. 726-730), US Department of the Interior, Geological Survey, 1975.

energía disponible en un área determinada correspondiente a un campo geotermal, entonces se está calculando un recurso inferido, lo que quiere decir que es una estimación con menor grado de certeza. El recurso indicado es, por último, el que se determina tras los estudios y análisis geológicos, geofísicos y geoquímicos en un área concreta. Se pasa, pues, de ser un recurso inferido a indicado y, finalmente, medido, conforme se avanza en el conocimiento geocientífico de un sistema geotermal dado. Esta última sintaxis es clave y la retomaremos en la sección 3.5.

La conexión con definiciones mineras puede tener un sentido geológico, pero el recurso geotermal también se puede aprovechar de forma directa para climatizar viviendas, temperar invernaderos, deshidratar vegetales y secar madera, entre otras aplicaciones. La semántica minera no es funcional para ninguno de estos aspectos y la investigación geotermal lo ha asumido a medida que se desarrolla. Veamos un poco de esta historia.

3. Orígenes de la exploración geotérmica en Chile

En esta sección presentaremos un relato documentado de cómo se ha desarrollado la exploración geotermal en Chile desde mediados del siglo XIX. Revisaremos las motivaciones de los exploradores y las metodologías que han utilizado para caracterizar los recursos geotérmicos.

3.1. Los naturalistas de antaño (1848-1909)

Siempre se destacan las exploraciones realizadas en la década de 1920 como las primeras exploraciones geotermales con fines de aprovechamiento. Sin embargo, más de 70 años antes, Ignacio Domeyko escribió una de las primeras descripciones científicas de termas en Chile. En su libro *Viaje a las cordilleras de Talca i Chillan* (1849), Domeyko describe termas en áreas volcánicas de la Región del Maule (Descabezado Grande, Descabezado Chico, Cerro Azul, etc.), y las termas de Chillán, donde ya existía infraestructura importante para el aprovechamiento medicinal:

*“No son de nuevo descubrimiento estas aguas: aun parece que los habitantes del sur las visitaban desde los tiempos mas remotos, i el uso de ellas cada día mas i mas se acreditaba... Felizmente un activo empresario, vecino de Chillan, supo sacar partido de ellas: compuso el camino, edifico casitas i proporcionó lo más necesario e indispensable para la comodidad de los enfermos... Es actualmente uno de los establecimientos de baños mejor provistos de recursos en Chile. I, aunque colocado a unas 140 leguas de Santiago en lo más alto i desierto de las cordilleras, lleva inmensa ventaja a los de Apoquindo, que se hallan casi a la puerta de la capital”.*¹¹

¹¹ Ignacio Domeyko, *Viaje a las cordilleras de Talca i Chillan*, 1849 (en *Anales Universidad de Chile*. 1850. p. 9-29 y 47-74. *Mineralogía, Tómo 5*, p. 319-84).

Domeyko llegó a Chile en 1838, contratado por autoridades de la provincia de Coquimbo, para enseñar mineralogía y química en un liceo de La Serena. En dos años logró formar 14 estudiantes, quienes fueron, en la práctica, los primeros ingenieros de minas de Chile. Se dedicó constantemente al análisis de los minerales y materias primas que obtenía en sus exploraciones en terreno. Como muchos eran componentes nuevos, se vio obligado a desarrollar él mismo numerosos métodos de análisis, lo que eventualmente vuelca a su investigación en geotermia. Como consecuencia, las primeras exploraciones contaron con una fuerte base química y mineralógica, heredadas de la industria minera:

*“El agua al salir de los agujeros es clara i perfectamente diáfana, despide un olor de hidrógeno sulfurado mui fuerte, i a pocos ratos empieza a enturbiarse, perdiendo su olor i formando un depósito de polvo blanco de azufre, tenue i mui dividido”.*¹²

Las descripciones de Domeyko de las termas son muy detalladas; hacen referencia a las rocas o sedimentos desde donde brota el agua termal, su disposición, tamaño y temperatura. También describe las propiedades organolépticas de las aguas termales; olor, sabor y turbiedad, además del detalle de los minerales que precipitan. Todos esos aspectos han continuado siendo la base del reconocimiento geotermal hasta la actualidad, y son los primeros que se enseñan en la clase de descripción de manifestaciones geotermiales en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

Un aspecto clave es que Domeyko no solo realizó descripciones, también tomó muestras de aguas termales en botellas de vidrio y realizó análisis químicos de su composición. Lamentablemente, debido a la falta de un croquis topográfico, y en vista de que las manifestaciones termales han cambiado en 150 años, no sabemos exactamente a cuáles se refiere en sus análisis. A pesar de esto, los resultados presentados por Domeyko son espectacularmente parecidos a los obtenidos 152 años después en investigaciones modernas en lo que actualmente es el valle de Las Termas (Figura 6).

Entre los años 1848 y 1868, de manera paralela al trabajo de Domeyko, y por encargo del gobierno chileno, se llevaron a cabo una serie de expediciones en el norte del país. El gobierno de Chile actuaba motivado por explorar territorios en disputa con el gobierno boliviano, por lo que deseaba describir rápidamente su mineralogía y geología. Las expediciones fueron guiadas por el copiapino don Diego de Almeyda; uno de los más notorios exploradores mineros del desierto de Atacama, y lideradas por el naturalista alemán Rodolfo Amando Philippi y el geólogo francés Pedro José Amado Pissis.

¹² Ibid.

Figura 6. Análisis químico de las termas de Chillán en *Viaje a las cordilleras de Talca i Chillan* (Domeyko, 1849).

	en un litro o mil granos en
	gr.
Sulfato de sosa	0,090
Sulfuro de sodio	0,050
Cloruro de sodio	0,012
Carbonato de sosa	0,044
Carbonato de cal	0,250
Sulfato de magnesia	0,006
Hierro i alumina	0,024
Silice	
Acido carbónico libre i azoe, cantidad indeterminada	
Materia orgánica.	0,495

Philippi destacó por sus exploraciones en las termas del sur de Chile, donde describió detalladamente las termas de Chillán.¹³ Por su parte, Pissis publicó un destacado reconocimiento del desierto de Atacama, por el cual fue nombrado miembro de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

Hasta 1859, Pissis había publicado en París los mapas de las provincias de Santiago, Aconcagua y Valparaíso, además del *Plano Topográfico y Geológico de la República de Chile*. En 1875 publicó también en París su obra más importante, *Geografía física de la República de Chile*, donde se preocupó de la orografía chilena, describió formaciones geológicas, la meteorología y pormenorizó las hoyas hidrográficas desde Copiapó hasta Reloncaví. En sus trabajos no solo incluye la descripción de áreas termales en el Altiplano y Puna del norte de Chile, también describe sistemáticamente la actividad volcánica en el centro-sur: Laguna del Maule, Chillán, Trapa-Trapa, Tingiririca, Peteroa y Maipo, donde distingue claras diferencias geoquímicas entre estas áreas y el volcán Antuco.

En su trabajo, Pissis describe las termas en similares términos químicos y mineralógicos que Domeyko, pero la naturaleza sistemática de sus exploraciones le permite desarrollar una hipótesis más elaborada respecto al origen de las termas en Chile.

“...Todo lo que precede nos induce a considerar las aguas termales como la última forma bajo la cual se manifiestan los fenómenos volcánicos. Todas las de Chile, en efecto, se abren paso, sea en medio de las rocas volcánicas, sea en las cercanías de estas mismas rocas; estas aguas presentan en su temperatura y su composición, una transición graduada desde los respiraderos volcánicos hasta las simples fuentes de agua fría...”

¹³ Rodolfo A. Philippi, *Viaje a los baños i al Nuevo volcán de Chillán*, 2da parte. Anales de la Universidad de Chile (1862): 377-389.

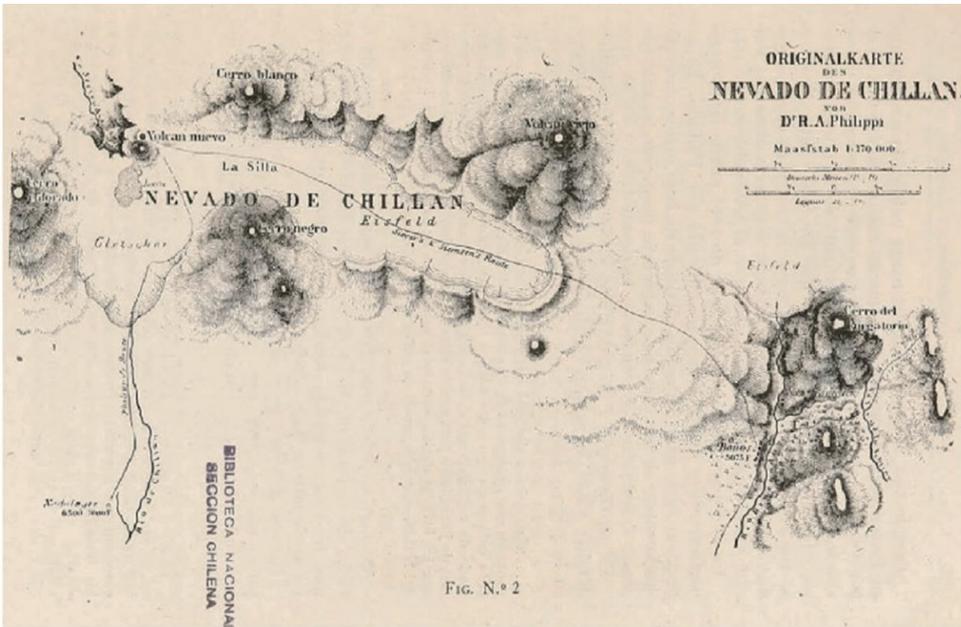


Figura 7. Ilustración de los glaciares del Volcán Nevado de Chillán (Rodolfo Philippi, 1862).

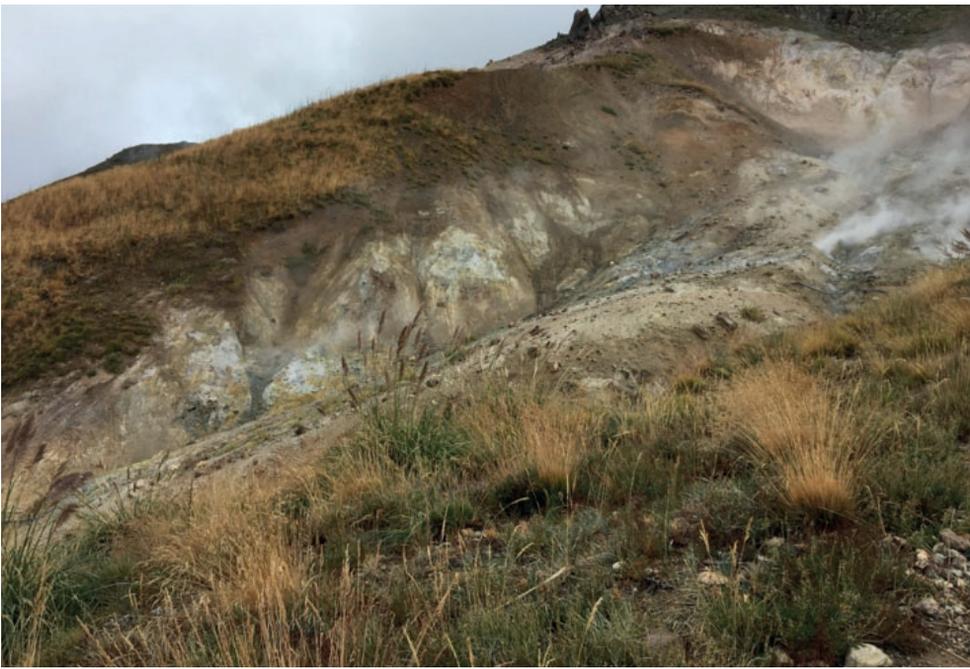


Figura 8. Quebrada con manifestaciones geotermiales y precipitación de minerales en el valle de las fumarolas de las termas de Chillán. A la izquierda se distingue parte de la columna eruptiva asociada a un pulso del proceso eruptivo iniciado en enero del 2017 (foto: Diego Aravena).

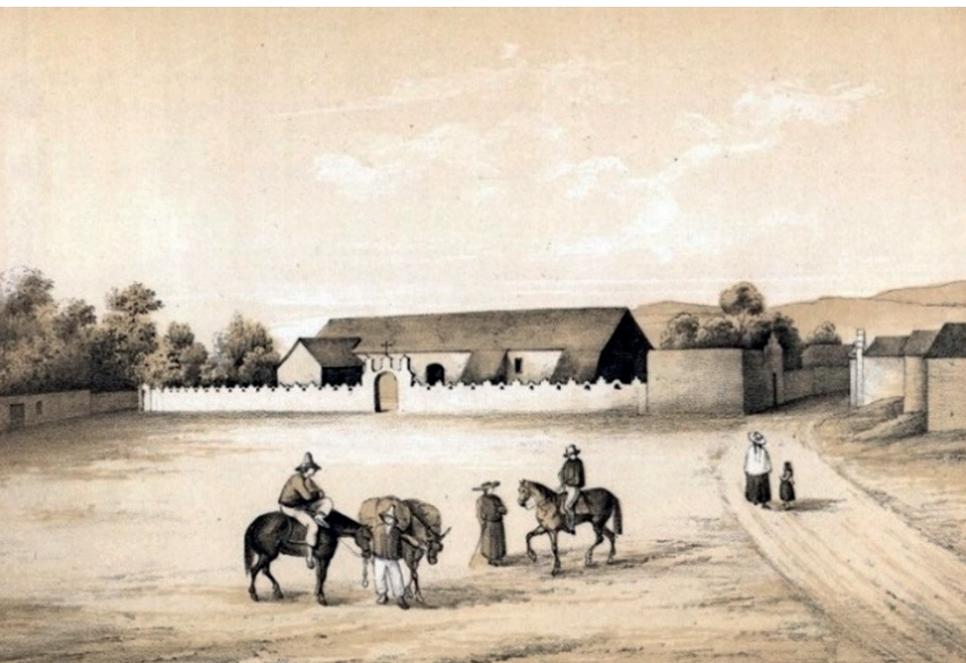


Figura 9. Plaza de San Pedro de Atacama: “Viaje al Desierto de Atacama: hecho de orden del gobierno de Chile en el verano 1853-54 por el doctor Rodolfo Amando Philippi”.

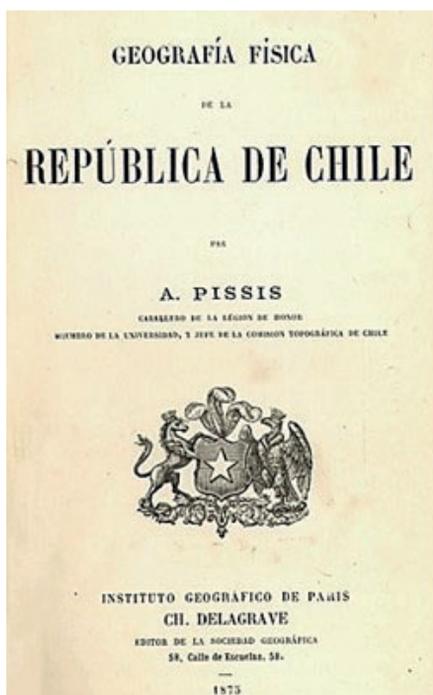


Figura 10. Portada de Geografía física de la República de Chile (José Pedro Amado Pissis, 1875).

Destaca una de las primeras comparaciones con otro territorio geotermal: Islandia. Pissis usa este ejemplo de manera recurrente para describir comparativamente fumarolas identificadas en la cercanía de distintos volcanes.

“...El cono llamado Volcán Viejo, situado al sur del Nevado, está rodeado, en su base, por numerosas fuentes termales, varias de las cuales son intermitentes y despiden chorros de vapor y agua hirviendo, que recuerdan, en pequeño, los Geysers de la Islandia...

...en la base los volcancitos comparables al geysir de Islandia, y en fin, fuentes termales sulfurosas...

...Hechos semejantes a los que acabamos de referir se observan en otros muchos volcanes de Chile: las solfataras de Trapa-trapa, de Tinguiririca, de los volcanes de Peteroa del Maipo, no difieren en nada de las de Chillan, y si no se encuentra el geysir en las cercanías, hay a lo menos las fuentes termales sulfurosas. El volcán de Antuco es una excepción notable...”

Además de los exploradores europeos invitados por el gobierno de Chile, hay trabajos importantes de exploradores locales. Francisco Javier San Román y Navarro fue un explorador, ingeniero en minas y topógrafo copiapino. Exploró y realizó la topografía del desierto de Atacama, participando en ocho campañas financiadas por el Estado chileno desde 1883 hasta 1887. Estos territorios habían sido recientemente anexados a Chile en el contexto de la Guerra del Pacífico (1879-1884), cuyo origen fue una larga disputa entre Chile y Bolivia para definir sus fronteras en el desierto de Atacama, específicamente en el territorio ubicado entre las latitudes 23° y 26° sur —entre los ríos Loa y Salado—, que pasa por la zona de los géiseres de El Tatio.

En 1890, San Román publicó la primera carta topográfica del desierto y cordilleras de Atacama y la presentó en el V Congreso Internacional de Geología, realizado en Washington. Las suyas es de las primeras descripciones geológicas de los géiseres de El Tatio, y ya en esos años se planteaba:

“¿Por qué una sola fuente termal en Toscana provee de bórax a todas las fábricas de Europa y nosotros no podemos surtir a todas las del mundo con los boratos inagotables de las cordilleras?”.

En las expediciones de San Román participó el noruego Lorenzo Sundt, “Ingeniero de minas i Jeólogo de la comisión Exploradora del Desierto de Atacama”, quién luego del fallecimiento de San Román publica el libro *Estudios Jeológicos i Topográficos del Desierto i Puna de Atacama* (1909). En este trabajo se compilan observaciones geológicas y topográficas realizadas

entre los años 1883 a 1885, donde se describen las áreas termales en los alrededores de El Tatio, las que son incluidas en un perfil geológico. El autor describe una de las áreas termales al sur de El Tatio:

“...En las cabeceras del Río Salado, al pie de los cerros de Tatio, se encuentran varias vertientes repartidas sobre una línea de una legua de largo con dirección Noroeste...

...en el fondo de una quebrada brotan varias vertientes en que se han edificado pequeños conos de arcilla de 4 a 6 metros de altura. Todos despiden vapor, especialmente en la mañana...”.¹⁴

Las observaciones de los autores nuevamente hacen referencia a aspectos químicos y mineralógicos. Pero así como Pissis hace referencia a los géiseres de Islandia y elabora sobre el posible origen de las termas, San Román señala:

“Ahora ¿debemos acaso suponer que los conglomerados i areniscas de Antofagasta se hayan depositado en una parte de la mar, 4.000 metros mas profundo que aquella en donde se depositaron los conglomerados i areniscas del cerro de Purilaste? Esto estaría en completa contradicción con lo que sabemos de los depósitos, que actualmente se forman en distintas profundidades. Los conglomerados son exclusivamente formación de las playas de poca profundidad; no bajan nunca ni siquiera a 1.000 metros, ni mucho me nos a 4.000. Por consiguiente, tenemos aquí otra prueba de que el eje de la cordillera ha sido solevantado”.¹⁵

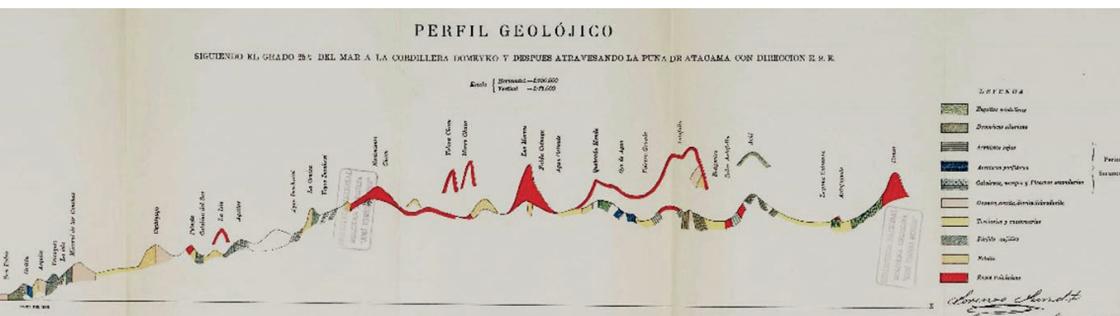
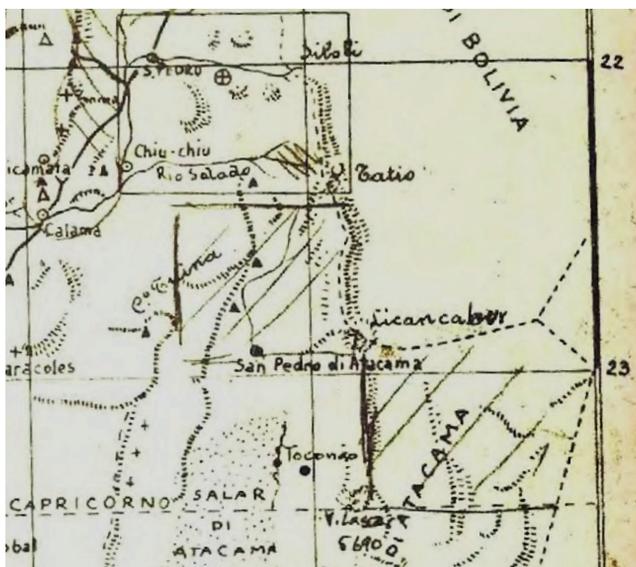


Figura 11. Perfil geológico publicado en *Estudios Jeológicos i Topográficos del Desierto i Puna de Atacama* (Lorenzo Sundt, 1909).

¹⁴ Lorenzo Sundt, *Estudios Jeológicos i Topográficos del Desierto i Puna de Atacama* (1909).

¹⁵ Francisco San Román, *El desierto y cordilleras de Atacama* (1896).

Figura 12. Parte del mapa construido por Tocchi (1923). En el mapa se distinguen localidades como San Pedro de Atacama y Toconao, y centros eruptivos como el Licancabur y los Cerros de Tatio.



3.2. La evolución de los usos de la geotermia: generación eléctrica y bomba de calor geotérmico (1908-1940s)

En 1904, el príncipe Piero Ginori Conti impulsa la construcción de la primera central eléctrica geotérmica en Larderello, Italia. Con una potencia de 250 KW, entró en funcionamiento en 1913. Con esta experiencia, llegó la realización de que las áreas termales pueden tener usos industrializados, idea que se instaló en Chile, que a partir de entonces fue uno de los primeros países del mundo que trató de aprovechar los recursos geotérmicos existentes en su territorio para la generación eléctrica.

Las exploraciones previas tenían un foco de exploración mineral, no obstante, habían mostrado que los Andes tienen un enorme potencial en aspectos térmicos. El interés de aprovechamiento para generación eléctrica en Chile nace en El Tatio y data de principios de siglo, cuando en 1908 la colonia italiana de Antofagasta formó una sociedad privada para intentar aprovechar los géiseres. Un grupo de pioneros, entre los cuales deben destacarse a Hugo Rolandi e Isidoro Spina, se interesó por estudiar las emanaciones de vapor de la región de El Tatio. En 1917 contrataron al ingeniero Juan Severina y organizaron diversas expediciones a la zona. Sus estudios fueron los que dieron origen a la Comunidad Preliminar de El Tatio (CPET).¹⁶ En 1921, gracias a las gestiones de la CPET, un equipo técnico liderado por los ingenieros Ettore Tocchi y R. Corrandini, llegó desde Larderello y perforó dos pozos de aproximadamente 60 metros de

¹⁶ Oficio 24.a de la cámara de diputados del 15 de julio de 1952, página 988.

profundidad,¹⁷ fluyendo uno de ellos por alrededor de 30 años. Estas actividades fueron suspendidas en 1922 por problemas técnicos y económicos.

Además de la utilización de la geotermia para generar electricidad, los comienzos del siglo XIX fueron suelo fértil para una revolución tecnológica e industrial: la bomba de calor geotérmico.

La bomba de calor fue teorizada por el ingeniero norteamericano Oliver Evans en 1805, quien produjo un diseño de un refrigerador utilizando un ciclo de compresión–expansión de éter.¹⁸ En 1834 el inventor estadounidense Jacob Perkins usó un diseño similar al de Evans y llenó una patente en los Estados Unidos titulada: “Mejoramiento del aparato y medios para la producción de hielo y fluido refrigerante”. La construcción de estos prototipos se llevó a cabo de manera comercial a partir de la década de 1850 en Australia y Estados Unidos, y veinte años después ya se instalaban sistemas de refrigeración en barcos de transporte de carne.¹⁹

En 1852, William Thomson (también conocido como Lord Kelvin) sugiere que se podría usar un concepto de bomba de calor para transportar calor desde la atmósfera y entregarlo a mayor temperatura al interior de una edificación.²⁰ La idea durmió hasta los años 20 del siglo XX, cuando T.G.N. Haldane construyó una bomba de calor para climatizar su hogar en Escocia.²¹ Con esto nació el aire acondicionado (que aún no es geotermia). Si bien el sistema implementado por Haldane aún no se consideraba geotermia, pocos años después, en los años 40, se clamaba la existencia de decenas de bombas de calor en Estados Unidos y Suiza, que funcionaban tomando calor del agua subterránea, ríos, lagos y calor industrial.²² Estas aplicaciones se consideran las primeras bombas de calor geotérmico.

¿Qué importancia tiene el desarrollo de esta tecnología? Pues como el nombre lo indica, permite por primera vez transportar calor fácilmente desde un sitio frío a uno caliente, sentando las bases de la climatización geotérmica con todos sus beneficios (ver capítulo III).

3.3. El profesor Brügger y las incursiones de la academia

Entre los años 1920 y 1925, en Iquique se solicitaron al gobierno concesiones para aprovechar los Géiseres de Puchuldiza, pero no hay ante-

¹⁷ Ettore Tocchi, "Il Tatio, Ufficio Geológico Larderello SpA.", Unpublished Report (1923).

¹⁸ David Banks, *An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling* (John Wiley & Sons, 2012).

¹⁹ R.D. Heap, *Heat pumps*. (London, 1979).

²⁰ William Thomson, "LXVII. On the dynamical theory of heat", *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 4, (Diciembre, 1852): 424-434.

²¹ Thomas G. Haldane, "The heat pump—an economical method of producing low-grade heat from electricity", *Journal of the Institution of Electrical Engineers* 68 (1930): 666-675.

²² R.D. Heap, *Heat pumps*. (London, 1979); M. Zogg, Zogg, M., *History of heat pumps-Swiss contributions and international milestones* (2008)

cedentes que indiquen si alcanzaron a desarrollar actividades al respecto. Durante las décadas siguientes, hubo estudios e informes esporádicos por parte de investigadores de la Universidad de Chile y la Universidad de Múnich, lo que generó cierto interés de las autoridades (Figura 13).

La enseñanza e investigación en Geología en la Universidad de Chile se inició con Ignacio Domeyko, uno de los fundadores de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, y posterior rector de la Universidad entre 1867 y 1883. Como profesor de Geología fue sucedido por Johannes (Juan) Brügger, creador del Instituto de Geología en 1950, quien fue sucedido por su alumno, el ingeniero de minas Jorge Muñoz Cristi, que en 1952 participó, junto con el geógrafo Humberto Fuenzalida y el ingeniero de minas Héctor Flores, en la creación del Curso Especial de Geólogo, posteriormente transformado en Escuela de Geología y, finalmente, en Departamento de Geología en 1968.²³

El profesor Johannes Brügger Messtorff es considerado por muchos el padre de la Geología en Chile y fue quien escribió el libro *Fundamentos de Geología de Chile* (1950), que trazó una primera visión integrada de la geología chilena y que refunde el conocimiento adquirido en 40 años de investigación. Además, creó el Instituto de Geología en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, primer centro académico de la disciplina en la Universidad de Chile y en el país. El profesor Brügger confeccionó mapas geológicos de la zona de El Tatio (1942) y de las termas de Chillán (1948), los que despertaron cierto interés en el aprovechamiento de los géiseres.

En 1954 el gobierno de Chile solicita al Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) estudiar la posibilidad de suscribir un convenio para estudiar los recursos geotérmicos. Para esto, viajaron al país expertos de Naciones Unidas que informaron positivamente sobre esta posibilidad. El trabajo de Brügger fue complementado poco después, entre 1957 y 1959, por el geólogo Zeil Werner de la Universidad de Múnich, que construyó mapas topográficos y geológicos, además de medir y analizar la geoquímica de fluidos termales en El Tatio.

3.4. La época dorada de la exploración geotérmica en Chile (1964-1974)

En 1967 se firma un convenio entre el gobierno de Chile y el PNUD, nombrándose a CORFO como organismo gubernamental participante. CORFO creó el Comité Geotérmico con la función de “evaluar, prospectar y aprovechar los recursos geotérmicos” y comenzó, entonces, una amplia campaña de mapeo geológico que abarcó desde

²³ Reynaldo Charrier et al., “Contribución del Profesor Johannes Brügger a la geología en Chile”. En IV Congreso Argentino de Historia de la Geología - IV CAHGEO (La Plata, 15 y 16 de septiembre, 2016).

Toconce y Caspana hasta la frontera oriental de Chile (110.000 km²). Como resultado de esta campaña se identificaron cuatro prospectos altamente favorables: Puchuldiza, Surire, Jurase y Pampa Lirima (en orden de prioridad). En El Tatio se realizó un estudio en detalle que incluyó geofísica y geoquímica.²⁴

SESION 24.a ORDINARIA, EN MARTES 15 DE JULIO DE 1952

(Sesión de 16.15 a 18.55 horas)

PRESIDENCIA DE LOS SEÑORES TAPIA Y SMITMANS

PRESIDENCIA DE LOS SEÑORES TAPIA Y SMITMANS

N.º 9.—OFICIO DEL SEÑOR MINISTRO DE ECONOMIA Y COMERCIO

"N.º 780.— Santiago, 14 de julio de 1952.

En respuesta al oficio de V. E. N.º 98, de 13 de junio ppdo., relacionado con una petición de los Honorables Diputados, señores Ernesto Antúnez Rebolledo y don Juan de Dios Reyes, acerca de las posibilidades de desarrollo industrial de ciertas fuentes de energía eléctrica procedente de emanaciones de vapor, ubicadas en el lugar denominado "El Tatio", cerca de Calama, me es grato acompañar informe del Sr. Juan Brüggén, confeccionado en 1940 para el Departamento de Minas y Petróleo, que describe en forma muy acabada esa posible fuente de energía, y copia del Decreto N.º 592, de 7 de Abril de 1948, del Ministerio de Tierras y Colonización, que concede en arrendamiento terrenos fiscales en los geysers del Tatio al señor Hugo Rolandi Zanelli.

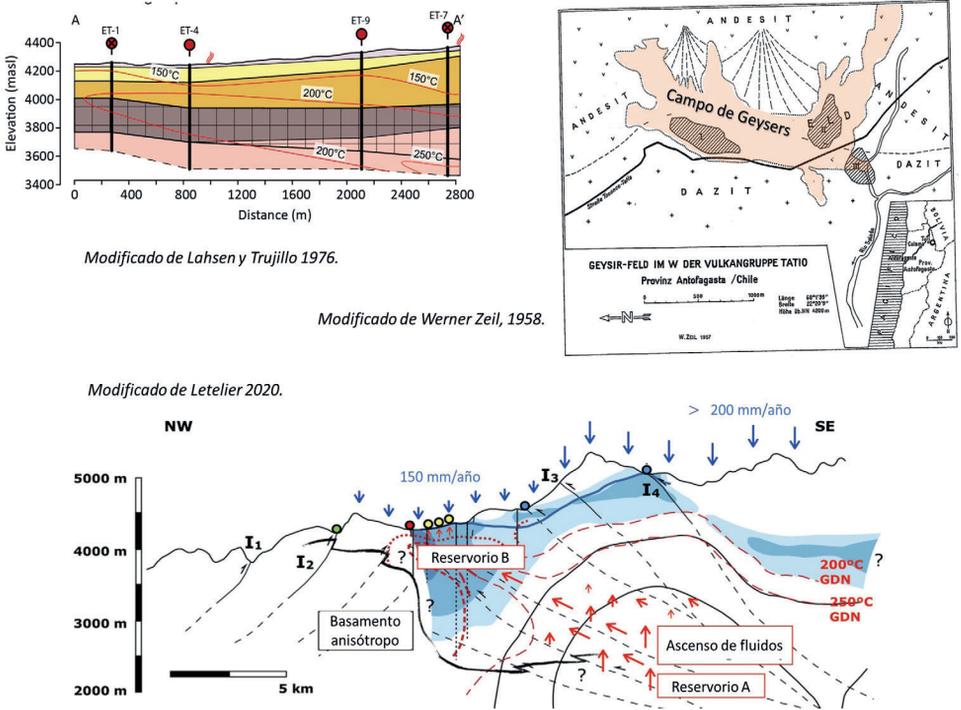
Dios guarde a V. E.— (Fdo.): **Pablo Larrain Tejada**".

Figura 13. Extracto de oficio 24.a ordinaria de la cámara de diputados del 15 de julio de 1952, página 988; donde se destaca El Tatio como zona de interés (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile).

Durante el desarrollo del proyecto de exploración de CORFO se perforaron pozos de exploración en un área de 30 km², que había sido definida con exploraciones geo-eléctricas. Se perforaron seis pozos de exploración hasta una profundidad promedio de 720 m, y siete pozos de producción con profundidades variables entre 900 y 1820 m. En tres de los pozos productores se midió una potencia aprovechable de 30 MWe (la entalpía del agua de producción era de 261 Kcal/kg). Se concluyó que en el campo geotérmico de El Tatio era factible instalar una central de 15 MWe.²⁵ Con posterioridad, el Comité Geotérmico de la CORFO continuó efectuando mediciones y en 1979 publicó un estudio de factibilidad que consideraba la instalación de 30 MWe y estimaba un potencial máximo instalable de 100 MWe.

²⁴ ELC-Electroconsult, *Exploitation of El Tatio Geothermal field, northern Chile, Feasibility Report*, 1975.

²⁵ *Ibid.*



Modificado de Lahsen y Trujillo 1976.

Modificado de Werner Zeil, 1958.

Modificado de Letelier 2020.

Figura 14. Evolución de algunos mapas y modelos geológicos desarrollados en El Tatio desde 1958 a la actualidad (modelos posteriores a 1958 son modificados de Lahsen y Trujillo²⁶ y Letelier²⁷).

Contando ya con antecedentes altamente favorables para la instalación de una planta geotérmica de generación de electricidad en El Tatio, en 1975 las Naciones Unidas comisionaron a un equipo consultor italiano para ejecutar un estudio completo para la instalación de una planta de 15 MWe.²⁸

El diseño propuesto incluía una turbina convencional de simple entrada y una torre de enfriamiento. El estudio de Electroconsult concluyó que el costo del KWh generado por una central geotermoeléctrica de las características señaladas, puesto en la subestación Km-6 de Chuquicamata, sería de solo US\$ 4,3 (de 1993), lo que se consideró constituía un atractivo resultado. En este trabajo evaluaron la factibilidad técnica y económica de generar electricidad, pero también se consideró la posibilidad de producir

²⁶ Alfredo Lahsen y Patricio Trujillo, El Campo Geotérmico de El Tatio, Chile. In *Proceedings: Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources* (San Francisco, California, USA, 20-29 de mayo, 1975): 157.

²⁷ Juvenal A. Letelier, John O'Sullivan, Martin Reich, Eugenio Veloso, Pablo Sánchez-Alfaro, Diego Aravena, Mauricio Muñoz, Diego Morata, "Reservoir architecture model and heat transfer modes in the El Tatio-La Torta geothermal system, Central Andes of northern Chile" *Geothermics* 89 (2021): 101940.

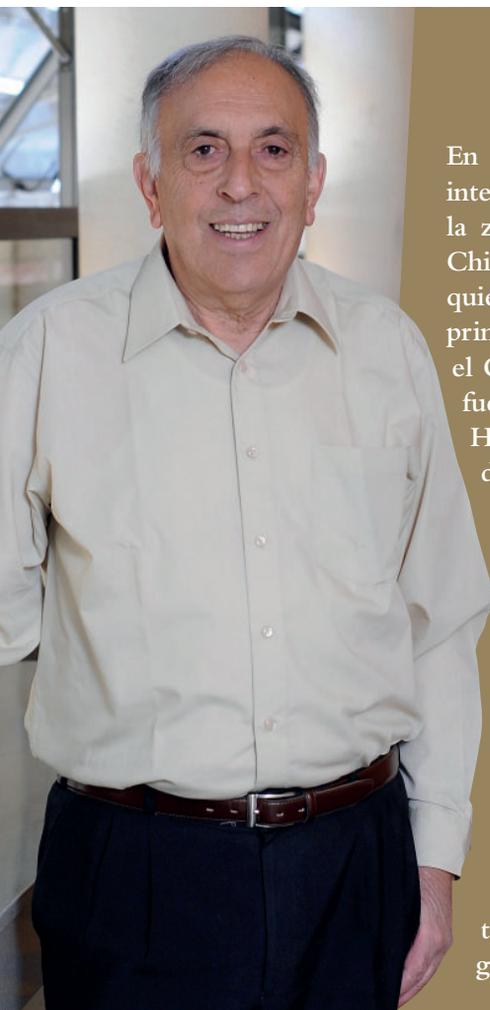
²⁸ *Ibid.*

agua potable e incluso de obtener minerales valiosos desde la salmuera (que son un desecho de la producción).

Esta “época dorada” permitió recabar mucha información geológica en el área geotermal de El Tatio y sus alrededores. Además, coincidió con los años formativos de eminentes profesores del Departamento de Geología, como Ricardo Thiele, Reynaldo Charrier y Alfredo Lahsen. Este último pudo aprovechar el impulso de CORFO y conocer en detalle proyectos en potencias geotermales como Nueva Zelanda, Estados Unidos, Turquía, Salvador y Japón, entre otros.

3.5. La carrera por estimar el potencial geotermal (1974-2020)

En los años 70 ya se apreciaba a nivel mundial la aplicabilidad que tiene la geotermia para generar electricidad, por lo que en todo el mundo se realizaban estimaciones de cuánta energía eléctrica era posible generar.



Profesor Alfredo Lahsen, pionero de la geotermia

En la década del 60, cuando existía gran interés por utilizar el calor de la Tierra en la zona de El Tatio, en la Universidad de Chile se titulaba el geólogo Alfredo Lahsen, quien décadas después sería uno de los principales promotores de la geotermia en el Chile del siglo XX. El profesor Lahsen fue académico de la Universidad de Chile. Habiéndose titulado en esa misma casa de estudios, se especializó en Italia e impulsó el desarrollo y la investigación de la geotermia desde su posición como académico del Departamento de Geología. También desde los cargos que ocupó en CORFO, particularmente en el programa de desarrollo geotérmico en el norte, ejecutado a fines de la década del 70. La historia de la exploración geotérmica en Chile no se podría entender sin el aporte y el impulso del profesor Lahsen, quien dedicó sus más de 40 años de trayectoria a estudiar y formar estudiantes en geotermia.

**CALCULATED WORLDWIDE GEOTHERMAL RESOURCE BASE
(joules)**

Country	Area (km ²)	X	Resource Base in Temperature Classes (°C)				Total
			<100 (Class 1)	100-150 (Class 2)	150-250 (Class 3)	>250 (Class 4)	
Chile*	7.6 E5	1.00	1.6 E23	1.7 E23	4.6 E22	2.7 E21	3.8 E23

Figura 15. Potencial geotermal estimado para Chile en 1978: recursos disponibles en fluidos a menos de 100 °C, 100 °C a 15 °C, 150 °C a 250 °C y más de 250 °C. La energía total es 3.8x10e23 J. (EPRI 1978).

En 1978, Electric Power Research Institute publicó un documento en la World Energy Conference, donde calculan el recurso geotermal base en Chile y el mundo.²⁹

En 1981 Aldrich publicó una actualización, utilizando básicamente la misma metodología y cambiando algunos supuestos. Esta nueva estimación es más del doble de lo estimado en 1978 (aún se habla de “recurso base”, en Joules).

En 1986, Alfredo Lahsen, destacado profesor del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, utiliza el recurso base estimado por Aldrich, pero solo la fracción contenida en fluidos con temperaturas sobre 150 °C (Aldrich consideró fluidos y roca). El profesor Lahsen propone, además, que solo una milésima fracción de este recurso pudiese constituir reservas geotermales técnica y económicamente explotables y utilizables en la generación de electricidad. Por lo tanto, con un factor de utilización de un 8%, la producción potencial de energía eléctrica en Chile sería del orden de 1.48x10e18 J, equivalente a 16.000 MWe por, al menos, cincuenta años y estando ubicados los reservorios a profundidades inferiores a los 3.000 m.³⁰

Este número se aproxima a los 40.000 Mwe estimados por Aravena et al., en 2015 en base al volumen de edificios volcánicos y su posible cámara magmática (Figura 16).³¹

La década del 90 se caracterizó por los nuevos estudios realizados por empresas privadas en conjunto con la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP) para estudiar el potencial de los campos geotermales en el norte y sur del país. De este modo, durante los años 1995 a 1999 se mantuvo un programa de cooperación entre ENAP y Unocal Corp. para explorar el norte de Chile. En el sur la cooperación se hizo con la Compañía Francesa de Geotermia (CFG), finalizando en el año 1995 con un pozo exploratorio

²⁹ Electric Power Research Institute (EPRI), “Geothermal Energy Prospects for the Next 50 Years”, Preliminary Report to the Conservation Commission World Energy Conference (Febrero, 1978).

³⁰ Alfredo Lahsen, “Origen y potencial de energía geotérmica en los Andes de Chile”. En *Geología y Recursos Minerales de Chile* (Vol. 423), Universidad de Concepción (1986)

³¹ Diego Aravena, Ignacio Villalón y Pablo Sánchez, “Igneous related geothermal resource in the Chilean Andes”. In *Proceedings World Geothermal Congress* (Melbourne, Australia, 2015).

de 274 m de profundidad en el campo geotermal de Nevados de Chillán, obteniéndose temperaturas próximas a los 220 °C.³²

	7.57 x 10 ⁵ km ²			
Area of Country				
Mean Annual Temperature	15.0°C			
Fraction of Country in Geothermal Belt	1.000			
Type of Geothermal Belt	Complex			
	Class 1	Class 2	Class 3	Total
Resource Stored in Rock	2.39 x 10 ²³	3.34 x 10 ²³	2.50 x 10 ²³	8.23 x 10 ²³ J
Resource Stored in Water	6.87 x 10 ²²	4.31 x 10 ²²	1.85 x 10 ²²	1.30 x 10 ²³ J
Total	3.08 x 10²³	3.77 x 10²³	2.68 x 10²³	9.53 x 10²³ J

Figura 16. Estimación de potencial geotermal para Chile en 1981. La energía total es 9.53x10e23 J. (Aldrich, 1981).

El potencial estimado por ENAP fue mucho menor a los valores publicados previamente, tan solo unos 1500 MWe, cercano a estimaciones dadas desde el sector privado, proponiendo un potencial del orden de los 3350 MWe³³ (Figura 17), los que podrían implementarse en un período de 20 años considerando la tecnología vigente al 2010. Poco después, el Consejo Geotérmico, una institución gremial conformada en 2012 por empresas de exploración, estima que el potencial geotermal de 18 campos geotermales activos en Chile bordea los 1000 a 2440 MWe³⁴.

Certeza geológica

←				
Recurso medido ~120 MWe	Recurso indicado ~2.000 MWe		Recurso inferido 16.000 a 40.000 MWe	
Cerro Pabellón	Puchuldiza	Nv. Chillán	Tacora	Sierra Nevada
El Tatio	La Torta	Cordón Caulle	Colpitas	Puyuhuapi
Tolhuaca/Peumayen	Tinguiririca	Licancura	Surire	Puerto Cristal
	Mariposa	Pampa Lirima	Irruputuncu	Chimisa
			Olca	Manzanar
			Juncalito	B. Colina

Figura 17. Valores totales de potencial geotermal medido, indicado e inferido en Chile por diversos autores posteriores a 1986. La energía total estimada por Lahsen (1986) es 1.48x10e18J. Se indican algunos ejemplos de áreas geotermales pertenecientes a cada categoría de recurso (Lahsen 1986; Aravena et al 2015, 2016; Mesa de geotermia 2020; elaboración propia).

³² Fabián Sepúlveda y Alfredo Lahsen, "Geothermal exploration in central southern Chile (33°-41°S)". En *Geothermal Resources Council Transactions* Vol. 27 (12-15 de octubre, 2003).

³³ José Manuel Soffia y Jorge Clavero, "Doing geothermal exploration business in Chile, Energía Andina experience", *Geothermal Resources Council Transactions* 34 (2010): 637-641.

³⁴ Diego Morata, Diego Aravena, Alfredo Lahsen, Mauricio Muñoz, y Pablo Valdenegro, "Chile Up-Data: the First South American Geothermal Power Plant After One Century of Exploration". En *Proceedings World Geothermal Congress* (2020) : 1.

En el ámbito de la investigación, destacan los trabajos de Hauser (1997) por parte del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN),³⁵ donde se desarrolla un catastro de las manifestaciones termales de Chile y las investigaciones que se siguieron desarrollando en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile, principalmente en el ámbito de la volcanología, petrología y geoquímica.³⁶

En cuanto a la estimación del potencial geotermal en Chile, los trabajos más robustos y recientes corresponden al proyecto CEGA “Assessment of high enthalpy geothermal resources and promising areas of Chile” del año 2016, y a los resultados derivados de la Mesa de Geotermia, el año 2018.³⁷

El trabajo desarrollado por investigadores del CEGA en 2016 permitió evaluar el potencial geotermal de nueve sistemas geotermiales en los Andes chilenos. La investigación concluye que el potencial de estos sistemas es de 659 +- 439 MWe.³⁸

El año 2017 fue presentado el reporte final de la Mesa de Geotermia, una entidad público-privada impulsada por el Ministerio de Energía, que congregó a desarrolladores geotérmicos, empresas prestadoras de servicios, asociaciones gremiales, la academia, el servicio público y colegios profesionales. Durante varios meses de trabajo esta instancia, que contó con financiamiento del Banco Mundial y el apoyo técnico de la Fundación Chile y la Universidad de Chile, analizó el impacto que tendría el ingreso de la geotermia en la matriz eléctrica del país. Considerando la información aportada por las diferentes empresas geotérmicas con sus proyectos con mayor grado de desarrollo, se estimó que al 2030 se podrían incorporar en la matriz eléctrica 599 MWe con geotermia, a lo que sumarían 1487 MWe adicionales en el periodo entre 2030 y 2050.³⁹ Son unos 2000 MWe geotérmicos los que podrían estar instalados en Chile en unos pocos sistemas geotermiales distribuidos a lo largo del país (Figura 18), aportando una energía limpia y estable a nuestra matriz eléctrica.

3.6. Los inicios del siglo XXI: “La fiebre del oro”

En el año 2000, el SERNAGEOMIN publicó un listado de áreas termales de Chile, contabilizándose un total de 120 manifestaciones clasificadas como “fuentes probables”. En el mismo año se proclama la Ley

³⁵ Arturo Hauser, “Catastro y caracterización de las fuentes de aguas minerales y termales de Chile” (No. 50). (Servicio Nacional de Geología y Minería, 1997).

³⁶ Por ejemplo, Mario Vergara et al., “Jurassic and Early Cretaceous island arc volcanism, extension, and subsidence in the Coast Range of central Chile”, *Geol. Soc. Am. Bull.* 107 (1995): 1427-1440; Parada et al, 1996; Miguel A. Parada et al., “Multiple sources for the Coastal Batholith of central Chile (31-34 S): geochemical and Sr-Nd isotopic evidence and tectonic implications”, *Lithos* 46 (1999): 505-521.

³⁷ Diego Aravena et al., “Assessment of high enthalpy geothermal resources and promising areas of Chile”, *Geothermics* 59 (2016): 1-13.

³⁸ *Ibíd.*

³⁹ Ministerio de Energía, *Reporte Mesa de Geotermia. Rol de la geotermia en el desarrollo de la matriz eléctrica chilena*, julio 2018.

N° 19.657, también conocida como la Ley Geotérmica, que determina el marco regulatorio de la exploración y desarrollo geotérmico en Chile. Esta ley establece dos categorías de concesión: concesiones de exploración y concesiones de explotación. Se crea un proceso de licitación y adjudicación de concesiones que estaba, en ese entonces, a cargo del Ministerio de Minería, y todo parecía indicar que Chile podía transformarse en una potencia geotermal.

La nueva ley de concesiones geotérmicas animó a empresas privadas a realizar numerosas campañas de exploración geotérmica (estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos) en áreas en las que apenas se disponía de información geológica previa. Rápidamente, se pasó de tener tan solo tres áreas con pozos geotérmicos exploratorios (El Tatio, Puchuldiza y Chillán) a un número significativo de áreas donde estas empresas desarrollaron (y siguen desarrollando) campañas de exploración superficial e, incluso —en algunas de ellas— nuevos pozos exploratorios o de producción (Tinguiririca, Cerro Pabellón y Tolhuaca).

El año 2008 ocurre un evento clave, se proclama la Ley N° 20.257, concerniente a cuotas de generación eléctrica con energías renovables no convencionales (ERNC). A partir de esta proclamación, las compañías generadoras deben demostrar que un 10% de la energía consumida del sistema interconectado es producida por energías renovables como solar, eólica y geotermal. Este es el único incentivo que se ha creado para productores de energías renovables en Chile.

Para el año 2010, más de 45 áreas estaban siendo exploradas por más de diez compañías.⁴⁰ El mismo año, se crea el Ministerio de Energía, nueva entidad a cargo del proceso de concesión, y el gobierno de Chile se compromete en una serie de iniciativas que implican aumentar de forma considerable las ERNC y, en particular, incluir la geotermia en la matriz energética.

Para el año 2013, existían 148 concesiones de exploración y siete concesiones de explotación (concedidas o en proceso), con 18 compañías explorando activamente en los Andes chilenos.⁴¹ ¿Por qué no se han comenzado a perforar pozos de producción en ninguna de las decenas de áreas exploradas? Como siempre, son varios factores: (1) si se compara con la minería, los costos de exploración y perforación son caros respecto a la recompensa, (2) el mercado financiero local no está lo suficientemente desarrollado, (3) no existen profesionales capacitados, (4) los plazos e inversiones exigidos en el proceso de concesiones chileno no son consis-

⁴⁰ Pablo Sánchez, Diego Morata, Alfredo Lahsen, Diego Aravena y Miguel Ángel Parada, "Current status of geothermal exploration in Chile and the role of the new Andean Geothermal Center of Excellence (CEGA)", *Geothermal Research Council (gRC) transactions* 35 (2011): 1215-1218.

⁴¹ Susan Hodgson, "Focus on Chile. Part I, II, and III", *Geothermal Resources Council Bulletin* 42 (2013).

tes con la naturaleza altamente riesgosa de la exploración.⁴² Sin embargo, Sánchez⁴³ parece dar con el dedo en la herida al establecer que las principales barreras son (5) una ausencia de políticas energéticas de largo plazo que guíen el desarrollo energético nacional, y (6) que mucha información geológica es generada por compañías privadas y no está disponible para desarrollar investigación. La poca información disponible para investigadores en esa época provenía de Evaluaciones de Impacto Ambiental, informes que contienen información poco clara y muchas veces deficiente, lo que dificultó la investigación que se quería desarrollar en torno a estos proyectos, exigiendo realizar esfuerzos mayores para completar la información disponible.⁴⁴

3.7. La formación del CEGA

A finales del año 2010 fue creado el Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes, un centro financiado por el Fondo de Financiamiento de Centros de Investigación en Áreas Prioritarias (Fondap) de CONICYT (hoy día ANID) por un período de cinco años, extensible a cinco años más. El centro nace gracias a la iniciativa de un grupo de profesores del Departamento de Geología de la Universidad de Chile (UCH), entre ellos: Alfredo Lahsen, Diego Morata, Miguel Ángel Parada, Martin Reich y Jacobus Le Roux, que son solo algunos de los destacados investigadores que postularon a este financiamiento y que impulsaron las primeras áreas de investigación del CEGA, sentando las bases de lo que sería una explosión en el ámbito de la investigación geotermal y el desarrollo de proyectos aplicados.

En el año 2012 se incorpora la Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC) como Institución Asociada del CEGA, con un grupo de geólogos estructurales y geofísicos recientemente contratados en esa casa de estudios, haciéndose cargo de una de las líneas de investigación principales del CEGA. De este modo, se conformó un centro de investigación donde la colaboración de investigadores de excelencia de la UCH y la PUC, en conjunto con otros investigadores nacionales e internacionales de diferentes instituciones, permitieron generar ciencia del más alto nivel, además de formar profesionales en los diferentes ámbitos de la geotermia. Una experiencia única en el país y en Sudamérica.

Durante la siguiente década, la misión de CEGA ha sido generar la base científica para desarrollar modelos de los reservorios geotérmicos en Chile y en los Andes, a fin de hacer de la energía geotérmica un recurso

⁴² *Ibíd*; Pablo Sánchez-Alfaro, Gerd Sielfeld, Bart Van Campen, Patrick Dobson, Víctor Fuentes, Andy Reed, Rodrigo Palma-Behnke y Diego Morata, "Geothermal barriers, policies and economics in Chile—Lessons for the Andes", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51 (2015): 1390-1401.

⁴³ *Ibíd*.

⁴⁴ Diego Aravena et al., "Assessment of high enthalpy geothermal resources and promising areas of Chile", *Geothermics* 59 (2016): 1-13.

sustentable, amigable con el medioambiente y económicamente competitivo. Para cumplir este objetivo, el centro ha abordado diversos aspectos: (1) mejorar y aumentar el conocimiento científico sobre los recursos geotérmicos en Chile y los Andes, (2) formar capital humano avanzado del más alto nivel, a fin de que éstos se incorporen a la industria y academia para desarrollar investigación básica y aplicada en geotermia, (3) generar un nuevo hábito de instrumentación analítica nacional mediante la implementación de instrumentación científica de última generación, hasta ese momento inexistente en el país, (4) promover la cooperación científica en investigación geotérmica entre el centro y otras instituciones académicas, así como con la industria, (5) identificar y evaluar tecnologías nuevas y emergentes para la exploración geotérmica y su desarrollo.

Desde su creación, CEGA ha participado en la publicación de cientos de trabajos de investigación; incluyendo *papers*, libros y trabajos de tesis. Con destacados aportes en diversas instancias académicas como el Congreso Geológico Nacional, Geothermal Resources Council, el congreso de la American Geophysical Union y el World Geothermal Congress. A lo largo de todo este documento encontrarán numerosas referencias a investigaciones desarrolladas por CEGA y que permitieron explorar, con un detalle inédito hasta la fecha, una enorme cantidad de áreas termales en el norte, centro y sur de Chile (Figura 18).

El respaldo de CEGA a la investigación permitió que nacieran líneas de innovación que no se habían desarrollado hasta el momento, como son el estudio de Geotermia y Sociedad (ver capítulo VII), Comunicación de la geotermia (ver capítulo V) y la Unidad de Proyectos Aplicados (ver capítulo III). El desarrollo de estas áreas, sumado a la destacada labor realizada en proyectos aplicados de la geotermia, le ha valido a CEGA importantes reconocimientos a nivel nacional e internacional. Uno de los principales objetivos del centro es la formación de profesionales con capacidades avanzadas en el ámbito de la geotermia, lo que se ha traducido en una gran red de profesionales que realizaron sus trabajos de título en temas relacionados; muchos de los cuales hoy trabajan en empresas de exploración, universidades y entidades estatales.

3.8. La importancia de la generación de conocimiento

Desde finales de 2017, funciona en la comuna de Ollagüe la primera planta de generación eléctrica en Chile y Sudamérica (el último de los continentes habitados sin plantas geotermiales) que es, a la vez, la planta geotermal más alta del mundo: Cerro Pabellón (ver capítulo IV). Además de la generación eléctrica, se ha instalado en Chile la semilla de la geotermia somera para climatizar espacios, mediante una tecnología limpia, renovable y costo-eficiente llamada bomba de calor geotérmico (ver capítulo III).

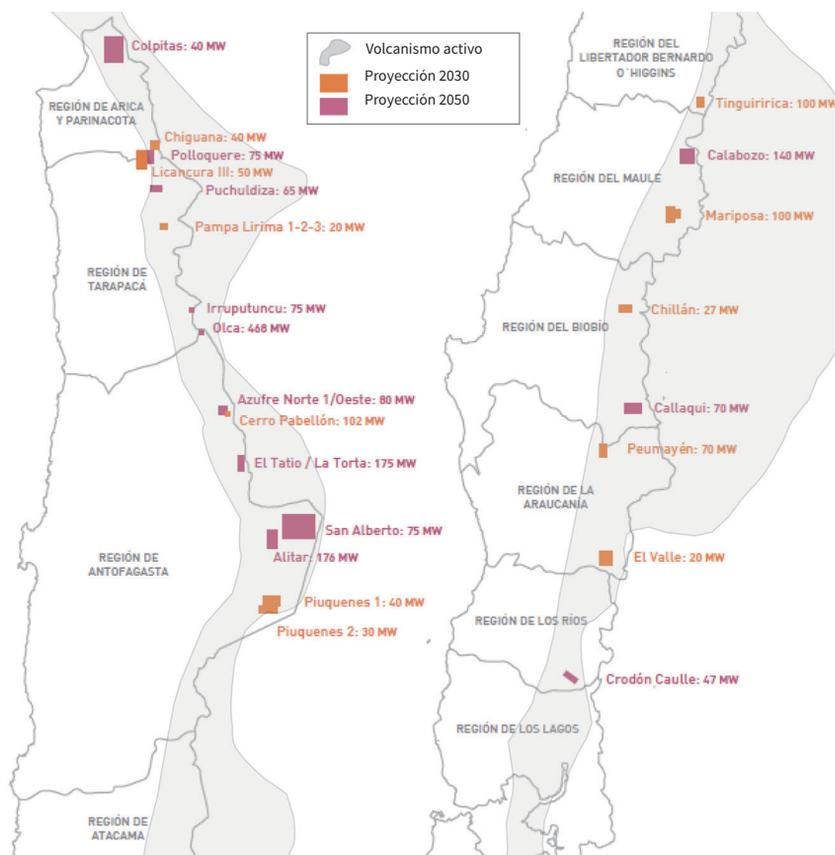


Figura 18. Áreas geotermales susceptibles de ser integradas a la matriz energética (modificado de Mesa de Geotermia 2018).

Las iniciativas llevadas a cabo por CEGA en el ámbito de la geotermia somera han demostrado que la tecnología de bombas de calor geotérmico es replicable en virtualmente cualquier contexto geológico (ver capítulos III y VIII). El CEGA ha realizado grandes esfuerzos para elaborar investigación que aporte al desarrollo de la geotermia somera en Chile,⁴⁵ sin embargo, se requiere aún más trabajo y que el Estado se incorpore como un actor más relevante de lo que ha sido hasta la fecha.

El uso de bombas de calor geotérmico en Chile comenzó en 1996, cuando se instalaron 51 unidades en el sur del país. Desde entonces ha ocurrido un incremento continuo, pero más bien lento, en el número de

⁴⁵ Mauricio Muñoz et al., "Estimating low-enthalpy geothermal energy potential for district heating in Santiago basin—Chile (33.5° S)", *Renewable Energy* 76 (2015): 186–195; Diego Aravena et al., "Estimating Low-Enthalpy Geothermal Energy Potential in Four Cities of Southern Chile: A Battle against Particulate Material Pollution", *Proceedings World Geothermal Congress 2020+1*; N. Hurtado et al., "Implementing a Geothermal Heat Pump in a School in Coyhaique, Chile", *Proceedings World Geothermal Congress 2020+1*; Diego Morata et al., "The First South American Geothermal Power Plant After One Century of Exploration", *Proceedings World Geothermal Congress 2020+1*; Mauricio Muñoz et al., "Geothermal Potential to Meet Heat Demand in Magallanes, Chilean Patagonia", *Proceedings World Geothermal Congress 2020+1*

unidades instaladas. Desde el año 2015, el rol demostrativo que han tenido los proyectos CEGA ha revitalizado el desarrollo de esta tecnología que, a diferencia de la generación eléctrica, tiene un enorme potencial de crecimiento y replicabilidad en todo el país (ver capítulo III).

Las primeras exploraciones a lo largo del siglo XIX fueron guiadas por intereses geopolíticos donde se buscaba explorar territorios en disputa e identificar recursos minerales.

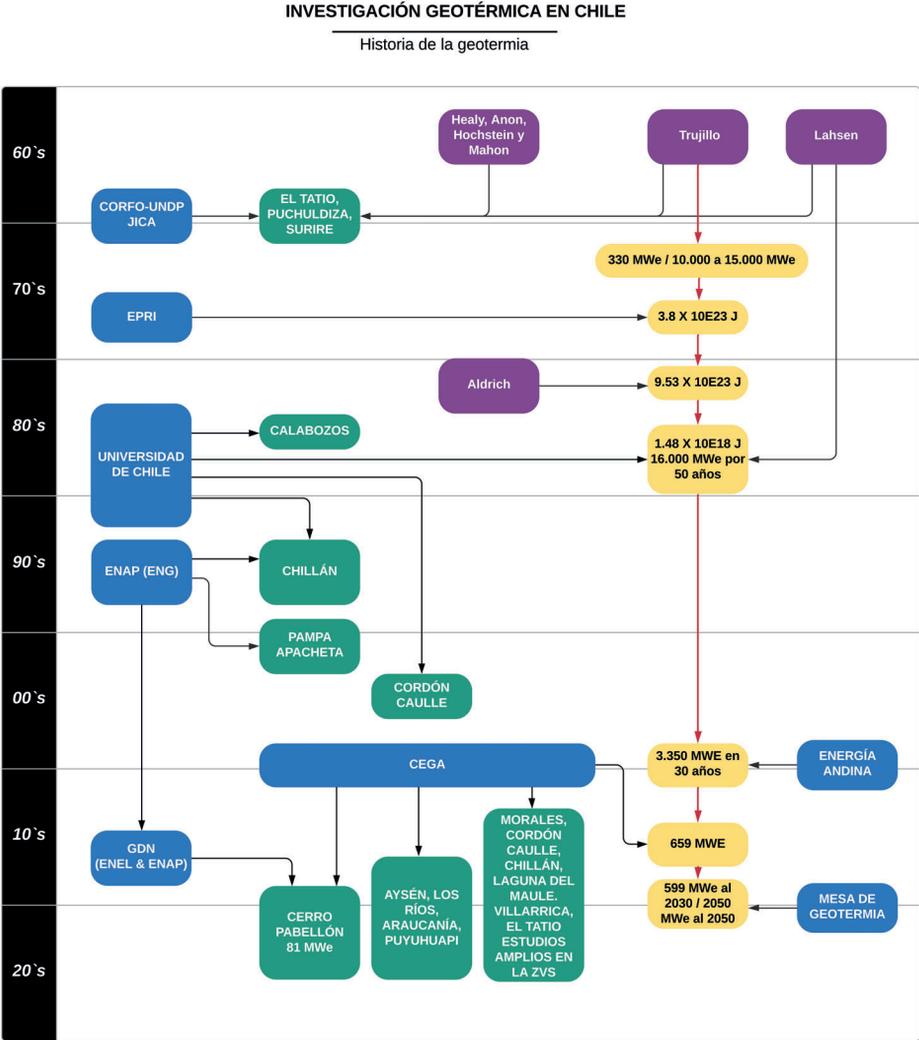


Figura 19. Línea de tiempo de la exploración e investigación geotermal en Chile desde la década de 1920 a la actualidad. Se distingue entre entidades institucionales (azul), áreas de estudio (verde) y valores de “Recurso Geotermal” calculados a lo largo del tiempo (elaboración propia).

La influencia del Estado ha sido esporádica, aunque a principios del siglo XX Chile vivió una notable estabilidad política cuando se promulgaron las primeras leyes sociales en nuestra historia,⁴⁶ lo que pudo influenciar el interés extranjero en El Tatio. Sin embargo, la exploración y primera perforación desarrollada a principios del siglo XX nació de una iniciativa privada. Si bien se realizaron investigaciones posteriores, no fue hasta la década de 1960, cuando se iniciaron las gestiones entre el Estado y las Naciones Unidas, que se materializó en la mayor campaña de exploración en Chile, en los años 60 y 70.

Además de la influencia del Estado en el desarrollo de la exploración, nuestra comprensión de la geotermia también ha evolucionado. En tiempos ancestrales existían aplicaciones utilitarias y religiosas. Para los exploradores y naturalistas del siglo XIX, la geotermia era aprovechable principalmente para balneología, pero también atrajo interés debido a su cercanía con zonas donde es posible encontrar recursos mineros. En este caso, la cordillera de los Andes se presentó como un importante laboratorio natural que despertó la curiosidad en torno a su origen, que no era explicado del todo por ninguna teoría.

Cuando el príncipe Conti construyó el primer generador geotermal en Italia, cambió para siempre la concepción de la geotermia. Ya no estamos solo frente a agua caliente con propiedades relajantes y medicinales; estamos frente a un “recurso” energético que se consideraba “inagotable”. Eso, hasta que la experiencia de las primeras plantas comenzó a mostrar un constante declive en la presión de los pozos, que fue contrarrestado al reinyectar parte de los fluidos en el reservorio geotermal (hasta ese momento, la reinyección de fluidos solo era utilizada para disponer de aguas residuales). Entonces nuevamente cambió nuestra concepción de la geotermia, ahora es una energía que se clasifica como renovable, pero que debe ser manejada cuidadosamente, lo que permitiría su aprovechamiento por cientos de años. A esta revolución energética se sumó una revolución tecnológica en el ámbito de la mecánica y termodinámica: la bomba de calor (ver capítulo III).

En pleno año 2022 sabemos que la energía geotérmica en Chile es constantemente renovada por el emplazamiento de magma y la presencia de elementos radiogénicos en la corteza terrestre. Tiene, por tanto, una característica estratégica, que no posee ninguna otra renovable: funciona día y noche, siete días a la semana, por lo que permite generar electricidad más del 90% del año. En contraste, las energías renovables de más rápido crecimiento (eólica y solar fotovoltaica) son fuertemente dependientes del clima, por lo que tienen mayor dificultad para suplir demandas constantes o para realizar fluctuaciones planificadas. Esta situación ejemplifica lo

⁴⁶ Oficio 24.a ordinaria de la cámara de diputados del 15 de julio de 1952.

positivo que es tener una matriz diversificada, donde se complementan al máximo las ventajas propias de cada energía renovable.

Un buen ejemplo de las bondades de esta forma de generar energía es el caso de ENEL y sus plantas de generación eléctrica en Italia y Chile (Cerro Pabellón). Durante la primera mitad del 2018, solo un 0,9% de la capacidad total de ENEL (renovables y no renovables) correspondía a energía geotermal, sin embargo, las plantas geotermales generaron un 2,4% del total de electricidad, es decir, produjeron energía más de un 80% del tiempo.

Esta capacidad es levemente superior a la energía nuclear, y muy por encima del resto de las fuentes, tanto renovables como no renovables, que promedian un 30%.⁴⁷

Los reservorios de los Andes son bien particulares. A continuación, se describen algunas áreas que aún están inexploradas y que podrían representar un enorme potencial geotermal en Chile y sus países limítrofes (Figura 20).

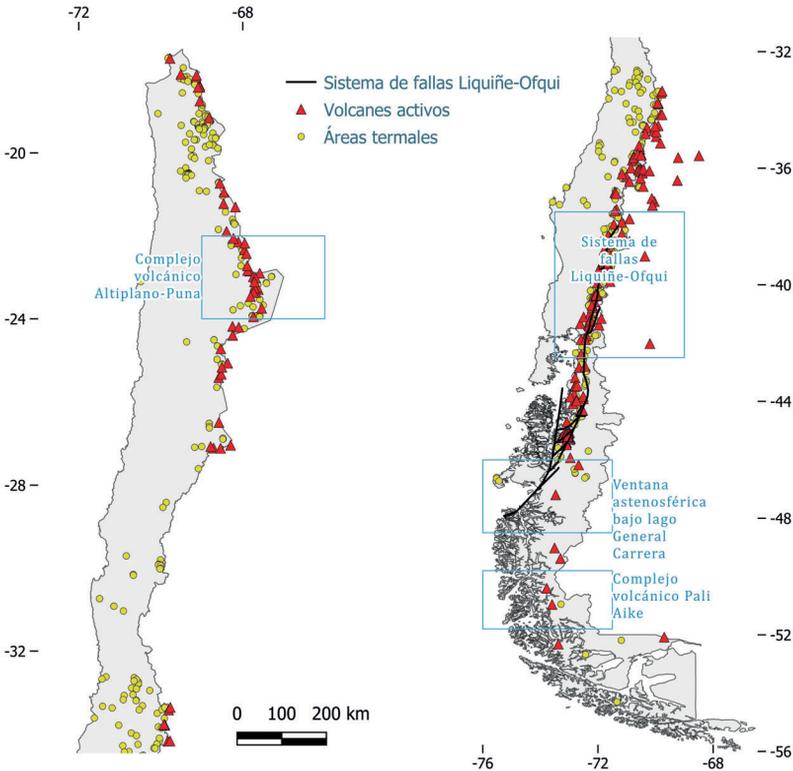


Figura 20. Algunas áreas de interés en los Andes chilenos (elaboración propia).

⁴⁷ Alexander Richter, "With 2% of capacity only, geothermal represents around 6% of Enel's renewable energy generation", *Think Geoenergy*, 27 de julio 2018.

Cuerpo Magmático Altiplano-Puna (CMAP): el CMAP es un volumen gigantesco de magma emplazado aproximadamente a 20 km de profundidad; bajo el Altiplano en la frontera entre Chile, Perú y Bolivia.⁴⁸ El CMAP alimenta las cámaras magmáticas que originan un enorme número de erupciones altamente explosivas, las que han ocurrido desde hace 10 millones de años hasta la actualidad.⁴⁹ Es el reservorio magmático más grande del mundo,⁵⁰ y asociados a esta fuente de calor existen numerosos sistemas geotermiales; incluyendo El Tatio, Sol de la Mañana y Cerro Pabellón, entre otros.⁵¹

Sistema de Fallas Liquiñe-Ofqui: corresponde a un enorme sistema de fallas geológicas alineadas a lo largo de más de 1200 kilómetros en el sur de Chile, desde el sur de la Región del Biobío hasta la Región de Aysén.⁵² Esta es una falla cortical, lo que quiere decir que corta prácticamente toda la corteza terrestre, por lo que podría ser una enorme fuente de calor y actividad tectónica en los últimos miles de años, y donde CEGA ha realizado numerosas investigaciones de alto impacto científico.⁵³ El gran número de estudios en esta zona tiene un motivo: la naturaleza de las fallas permite la recarga de fluidos a grandes profundidades, estableciendo las condiciones ideales para la formación de reservorios geotermiales.

Ventana Astenosférica bajo la Región de Aysén: el Lago General Carrera en la Región de Aysén es particular; algunas partes de su lecho están bajo el nivel del mar, lo que es inusualmente profundo. Al parecer, este lago está directamente sobre una ventana astenosférica, un segmento

⁴⁸ Josef Chmielowski, George Zandt y Christian Haberland, "The central Andean Altiplano-Puna magma body", *Geophysical Research Letters* 26(1999): 783-786.

⁴⁹ S.L. de Silva, "Geochronology and stratigraphy of the ignimbrites from the 21 30' S to 23 30' S portion of the Central Andes of northern Chile", *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 37 (1989): 93-131.

⁵⁰ George Zandt, Mark Leidig, Josef Chmielowski, David Baumont y Xiaohui Yuan, "Seismic detection and characterization of the Altiplano-Puna magma body, central Andes", *Pure and Applied Geophysics* 160 (2003): 789-807.

⁵¹ Diego Aravena et al., "Assessment of high enthalpy geothermal resources and promising areas of Chile", *Geothermics* 59 (2016): 1-13.

⁵² Francisco Hervé, "Estudio geológico de la falla Liquiñe-Reloncavi en el área de Liquiñe: antecedentes de un movimiento transcurrente (Provincia de Valdivia)", *Actas Congreso Geológico Chileno*, 1 (1976): B39-B56; José M. Cembrano et al., "The Liquiñe Ofqui fault zone: a long-lived intra-arc fault system in southern Chile", *Tectonophysics* 259 (1996): 55-66.

⁵³ Daniele Tardani et al., "Exploring the structural controls on helium, nitrogen and carbon isotope signatures in hydrothermal fluids along an intra-arc fault system", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 184 (2016): 193-211; Pablo Sánchez-Alfaro et al., "The optimal windows for seismically-enhanced gold precipitation in the epithermal environment", *Ore Geology Reviews* 79 (2016): 463-473; Angello Negri, Linda Daniele, Diego Aravena, Mauricio Muñoz, Antonio Delgado y Diego Morata, "Decoding fjord water contribution and geochemical processes in the Aysen thermal springs (Southern Patagonia, Chile)", *Journal of Geochemical Exploration* 185 (2018): 1-13.; Angelo Villalobos et al., "Active Faulting, Submarine Surface Rupture, and Seismic Migration Along the Liquiñe-Ofqui Fault System, Patagonian Andes", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 125 (2020): 2020JB019946; Nicolás Pérez-Estay et al., "Seismicity in a Transpressional Volcanic Arc: The Liquiñe-Ofqui Fault System in the Puyuhuapi Area, Southern Andes, Chile (44° S)", *Tectonics* 39 (2020): 2020TC006391; Luis Astudillo-Sotomayor et al., "Fast Holocene slip and localized strain along the Liquiñe-Ofqui strike-slip fault system, Chile", *Scientific reports* 11 (2021): 1-10; Gregory de Pascale et al., "Liquiñe-Ofqui's fast slipping intra-volcanic arc crustal faulting above the subducted Chile Ridge", *Scientific reports* 11 (2021): 1-12.

donde la corteza oceánica que subyace el continente se está separando,⁵⁴ lo que genera el ascenso de calor y masa desde el manto (que supera los 1200 °C). Esto es algo que podría asemejarse al contexto de Islandia o Kenia. Y como en esos lugares, se puede traducir en cantidades gigantescas de energía.

Magallanes y el Complejo Volcánico Pali Aike: este sitio corresponde a un campo volcánico que cubre 4500 km² de extensión, en la frontera entre Chile y Argentina en la Región de Magallanes. En esta zona ocurre un ascenso de material desde el manto, el que alimenta las erupciones del enorme campo volcánico.⁵⁵ La energía disponible en estas zonas de ascenso desde el manto es aún indeterminada, pero la temperatura del magma que alimenta estas erupciones supera los 1400 °C.

Las nuevas tendencias en la investigación en geotermia a nivel mundial están enfocadas a mejorar la sustentabilidad de los recursos geotermiales y a explorar nuevas tecnologías encaminadas al uso de los fluidos supercríticos y recuperación de metales a partir de los fluidos geotermiales. En este último tópico, las investigaciones que está desarrollando el CEGA, en colaboración con el Karlsruhe Institute of Technology (KIT) de Alemania, muestran que hay una posibilidad de desarrollo de una suerte de “minería verde”, aprovechando la tecnología existente, que permitiría —a partir de los fluidos geotermiales— generar electricidad, como hemos visto en este capítulo, además de recuperar elementos de gran valía económica como el litio. Por ahora, son proyectos en el ámbito de la academia, pero que, quizá en un futuro próximo, puedan ver la luz y darles un valor agregado a los inmensos recursos geotermiales existentes en nuestro país.

Otra de las posibilidades que se están investigando es la utilización de determinados sistemas geotermiales como una alternativa para reducir los niveles de CO₂ atmosférico. En la actualidad, ya existen pruebas exitosas de reinyección de CO₂ atmosférico en unidades geológicas profundas, donde el CO₂ se “secuestra” bajo tierra en la forma de minerales carbonatados (calcita, fundamentalmente —CaCO₃—). El proyecto CarbFix es una colaboración industrial académica desarrollada en Islandia para evaluar la factibilidad económica de esta tecnología, y desde el 2014 han reinyectado 68.693 toneladas métricas de CO₂ (www.carbfix.com). ¿Es esta una opción viable para revertir el aumento de CO₂ en la atmósfera del planeta? ¿Se puede reinyectar CO₂ en los Andes chilenos? El tiempo y la generación de conocimiento lo responderán.

⁵⁴Yves Lagabriele et al., “Magmatic–tectonic effects of high thermal regime at the site of active ridge subduction: the Chile Triple Junction model”, *Tectonophysics* 326 (2000): 255-268.

⁵⁵Marilena D'Orazio et al., “The Pali Aike volcanic field, Patagonia: slab–window magmatism near the tip of South America”, *Tectonophysics* 321(2000): 407-427.

4. Conclusiones

En este capítulo se relató cómo y por qué la Tectónica de Placas es la causa de fenómenos como terremotos, yacimientos minerales y cámaras magmáticas. Explicamos cómo se forma un sistema geotermal y cómo se puede aprovechar para generar electricidad o calefaccionar procesos y ambientes.

El concepto de “recurso” es eminentemente heredado de la exploración de yacimientos minerales. Un yacimiento mineral corresponde a una concentración anómala de elementos valiosos, lo que ha sido adaptado en el tiempo para describir la energía aprovechable en un reservorio geotermal, dinámico y complejo.

Los inicios de la exploración geotermal en Chile son mucho más antiguos de lo que se suele informar. En este trabajo se logró presentar un relato documentado de cómo se ha desarrollado ésta en Chile desde mediados del siglo XIX, revisando las metodologías que han utilizado diversos autores para caracterizar los recursos geotérmicos. Bajo el conocimiento actual, el potencial geotermal en los Andes chilenos puede alcanzar valores aún insospechados.

Finalmente, se presentó una reflexión sobre el desarrollo de capacidades locales para la exploración de recursos geotérmicos, la relación entre el desarrollo del área con las políticas de Estado y los actores privados, así como una revisión de la evolución de nuestra comprensión de la geotermia y de la geología chilena y su potencial de aprovechamiento.

Queda en evidencia una deuda importante: a pesar de que la geotermia es una energía de enorme valor estratégico, no ha sido considerada como tal por ningún gobierno hasta la fecha. Para que se desarrolle la geotermia se debe levantar una enorme cantidad de datos en terreno y se deben construir catastros robustos que reduzcan la incertidumbre para todos los actores involucrados. En Chile, esta tarea es cercana a imposible si no se cuenta con un apoyo rotundo del Estado, el que debe tener un rol protagonista. La posibilidad de implementar la geotermia en cualquier lugar permitiría energizar y climatizar sitios de interés estratégico, aportando enormemente a la soberanía e independencia territorial.



LA OPORTUNIDAD

Capítulo III

Usos de la geotermia y sus aplicaciones en Chile: estabilidad energética y aire limpio

Capítulo IV

Cerro Pabellón, primera planta geotérmica de Sudamérica: el dulce despertar de un sueño y el inicio de una nueva era

Capítulo V

Comunicación de la geotermia
Apéndice: Testigos Geotérmicos

CAPÍTULO III

Usos de la geotermia y sus aplicaciones en Chile: estabilidad energética y aire limpio

Mauricio Muñoz Morales, Nicolás Hurtado Arroyo y Esteban Micco

1. Introducción

Usar la energía geotérmica para satisfacer necesidades térmicas y eléctricas es una oportunidad para limpiar el aire, enfrentar el cambio climático y entregar soberanía energética. Sin embargo, su uso en Chile no alcanza siquiera el 1% de la oferta total de producción de energía; donde la mayor parte proviene de combustibles fósiles.¹ El aprovechamiento de la energía geotérmica no produce material particulado ni tampoco emisiones de gases de efecto invernadero. Es una energía disponible en todo el territorio y, por lo tanto, puede contribuir a la seguridad energética y la independencia de combustibles fósiles que, además de sus efectos nocivos a nivel local y climático, son importados.

En este capítulo los usos de la geotermia se dividen en dos grupos: los usos directos y la generación eléctrica. El segundo es el que suele ocupar el protagonismo cuando se habla de energía geotérmica, no obstante, la energía eléctrica representa solo un 21% del consumo total de energía en Chile² y, aunque las políticas de fomento apunten hacia la electrificación del consumo energético, los pronósticos de cambio estiman que podría llegar a un 30% en 2030.

El consumo energético actual en nuestro país muestra que poco más de un tercio se dedica al sector industrial y un porcentaje similar al transporte, y alrededor del 15% va al consumo residencial, comercial y de instalaciones públicas.³ Esto implica que la mayor parte es consumo de energía térmica, que podría ser provista por uso directo de geotermia, por ejemplo para la climatización de ambientes y la provisión de agua caliente sanitaria. De hecho, a nivel mundial la relación entre uso de la geotermia para producción de electricidad y para uso directo es de uno es a diez, de acuerdo con el registro de generación eléctrica⁴ y uso directo⁵ de la geotermia.

El acceso a una fuente de energía limpia y distribuida en todo el país

¹ Energía Abierta, "Balance Nacional de Energía 2019", Comisión Nacional de Energía. <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/balance-de-energia/> (consultada el 5 de enero de 2022).

² *Ibíd.*

³ *Ibíd.*

⁴ Gerald W. Huttner, "Geothermal Power Generation in the World 2015–2020 Update Report", *World Geothermal Congress, 17*, Reykjavik, Islandia (2020).

⁵ John W. Lund, y Aniko N. Toth, "Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review". *Geothermics* 90 (2021): 101915.

tiene repercusiones directas en la disminución de la pobreza energética, la soberanía energética y la justicia ambiental. En el caso de Chile, se suma la necesidad de descontaminar el aire en las regiones frías del sur, que dependen de la leña como combustible. La situación ambiental en las zonas urbanas es grave y tiene impactos directos en la salud de la población. La climatización con geotermia en estos territorios puede mejorar la calidad de vida de las personas. Además, los procesos de transformación hacia soluciones al problema energético territorial han demostrado que pueden convertirse en un espacio de diálogo. Esto ha sido la experiencia reunida por el área Geotermia y Sociedad del CEGA, cuyos aprendizajes se exponen en el capítulo VII, geotermia y sociedad.

Finalmente, en las distintas subsecciones de este capítulo se incluyen ejemplos de los distintos usos de la geotermia, indicando aspectos técnicos, económicos y sociales, con la intención de motivar a la transición energética hacia una matriz limpia y renovable en los sectores térmicos y eléctricos para garantizar un desarrollo sostenible del país.

2. Usos y recursos geotérmicos

En todo el mundo las unidades geológicas en profundidad tienen una temperatura estable que permite implementar al menos el uso directo de la energía geotérmica. Incluso los cuerpos de agua suficientemente grandes son térmicamente estables y cumplen un propósito idéntico al de las unidades geológicas que están en el subsuelo. Por otro lado, en sitios con anomalías termales, generadas principalmente por el volcanismo activo, la geotermia se puede utilizar de forma indirecta mediante la generación de electricidad. Se requieren al menos 120 - 150 °C para generar electricidad con geotermia.⁶ En estos contextos, el uso directo del calor es también una oportunidad asociada a la generación de electricidad, a lo que se llama cogeneración.

Si bien el recurso geotérmico está presente en toda la Tierra, el potencial de aprovechamiento energético depende del acceso al recurso, la existencia de anomalías termales y las necesidades energéticas. Es por ello que en este capítulo agrupamos los usos de la energía geotérmica en lugares sin anomalías termales y en lugares con anomalías térmicas (Figura 1).

⁶ Sadiq J. Zarrouk y Hyungsul Moon, "Efficiency of Geothermal Power Plants: A Worldwide Review", *Geothermics* 51 (2014): 142-53.

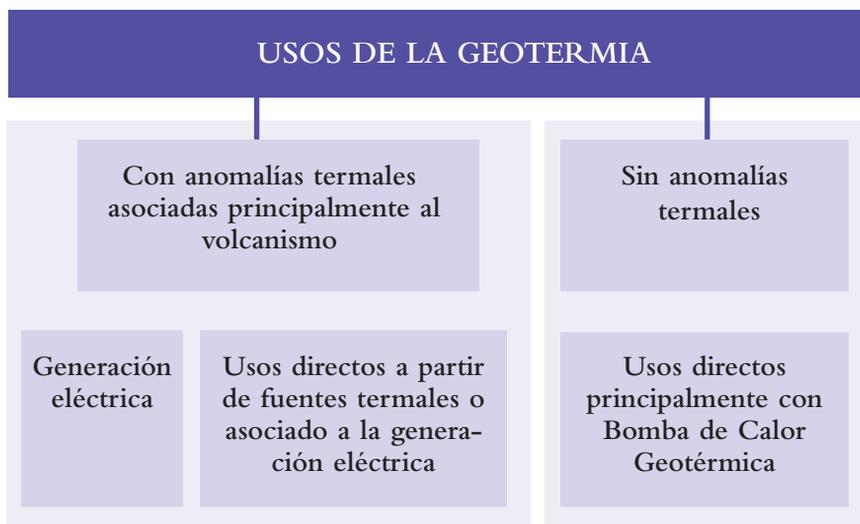


Figura 1. Usos de la geotermia. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la base de datos del Programa Global de Volcanismo,⁷ existe registro de 1.398 volcanes con erupciones durante el período del Holoceno (los últimos 10.000 años). Sin embargo, este importante número de volcanes están concentrados en áreas bien reducidas y específicas del planeta. Incluso en Chile, un país volcánico, la mayor parte del territorio no tiene anomalías de temperaturas generadas por volcanes como lo son las fuentes termales. De hecho, como puede verse en el capítulo II, las áreas con volcanismo y fuentes termales se encuentran en la cordillera de los Andes.

Respecto de la utilización de la geotermia (Figura 2), el uso directo de ésta es ampliamente desarrollado para proveer calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria, además de proporcionar calor y frío en diversos procesos productivos. A nivel global la potencia instalada del uso directo de geotermia al fin de 2019 era de 107.727 MW, lo cual representa un crecimiento del 52% respecto de 2015.⁸ La generación de electricidad mediante geotermia a nivel global es mucho más reducida (aproximadamente un 10% de la potencia instalada de uso directo) y está restringida principalmente a países del planeta con volcanismo activo.⁹

⁷ Lee Siebert, Tom Simkin y Paul Kimberly, "Volcanoes of the World". 3rd ed. (University of California Press, 2010).

⁸ John W. Lund, y Aniko N. Toth, "Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review". *Geothermics* 90 (2021): 101915.

⁹ Gerald W. Huttner, "Geothermal Power Generation in the World 2015–2020 Update Report", *World Geothermal Congress*, 17, Reykjavik, Islandia (2020).

USOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA A diferentes temperaturas

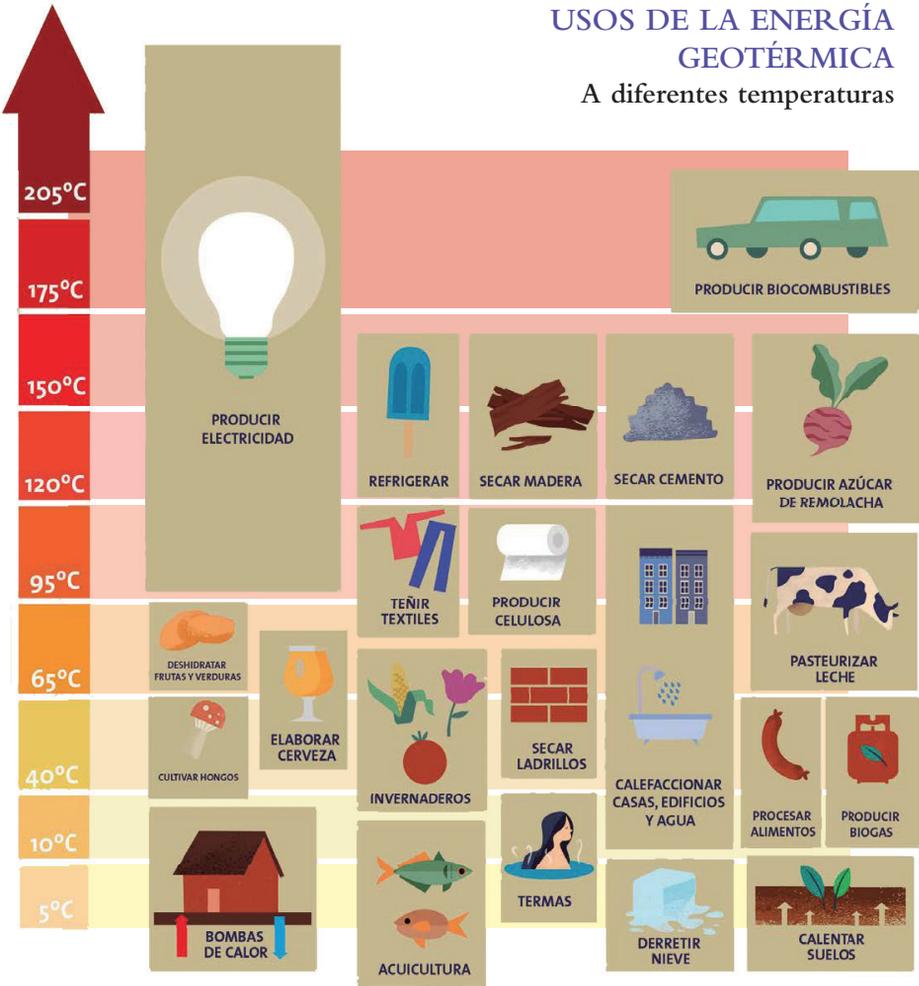


Figura 2. Diagrama de Lindal de usos potenciales de la energía geotérmica, adaptado de <http://geothermaleducation.org>

En Chile, históricamente, el uso de geotermia se ha focalizado principalmente en el uso directo de las fuentes termales para el turismo. En los últimos años, el uso directo de geotermia mediante bombas de calor geotérmicas (BCG) ha comenzado a desarrollarse para entregar calefacción y refrigeración para acondicionar espacios y procesos productivos. En términos de generación eléctrica, en septiembre de 2017 Enel y ENAP pusieron en marcha Cerro Pabellón, la primera planta de generación eléctrica en Sudamérica y la primera a gran escala construida a 4.500 metros sobre el nivel del mar en el mundo.

3. Lo primero: conocer el recurso geotérmico

Antes de decidir qué usos se le puede dar a la energía geotérmica es necesario conocer el recurso, en base a éste se podrá decidir sobre las posibles aplicaciones y tecnologías más apropiadas.

Como el recurso geotermal se encuentra bajo nuestros pies, es necesario explorarlo y medirlo para llegar a cuantificar su potencial. A continuación, se presentan las consideraciones respecto de la exploración del recurso geotermal que permiten determinar los niveles de temperatura, presencia de agua, caudal disponible y estabilidad de suministro.

La exploración de energía geotérmica se divide en al menos 3 etapas:

- a. Exploración superficial: los métodos de exploración comúnmente utilizados son el mapeo geotérmico y geológico, el levantamiento geofísico y el levantamiento geoquímico, incluido el muestreo y análisis de flujos de salida naturales.
- b. Perforación exploratoria: si la exploración superficial produce resultados positivos, el siguiente paso es probar la existencia de un reservorio geotérmico mediante perforación y pruebas con pozos que lleguen al recurso geotérmico. El costo de esta fase es superior al de la exploración superficial, pero es la única forma de determinar de forma inequívoca el recurso geotérmico. En esta etapa se precisa la temperatura, presión y composición química de los recursos geotérmicos.
- c. Fase de valoración y operativa: durante la operación, el recurso geotérmico necesita ser reevaluado utilizando datos recolectados de pozos existentes. También se estima la capacidad de producción sostenible para permitir una mejor planificación para el futuro.

En el caso de usos directos de baja temperatura, la profundidad y diámetros de los pozos son menores con respecto a los pozos requeridos para generación eléctrica. En procesos de menor escala, el simple almacenamiento de agua de las fuentes termales podría ser suficiente para suministrar calor a un proceso productivo compatible con los niveles de temperatura. En cualquier caso, el entendimiento de la circulación de fluidos termales es muy relevante para anticipar posibles variaciones de caudal y temperatura.

Los proyectos que el CEGA ha desarrollado en Aysén nos muestran lo importante de seguir cada etapa de exploración y comprensión del recurso geotérmico, para llevar a cabo una apropiada gestión del recurso. Al mismo tiempo muestran lo importante de seguir los primeros momentos de la operación.¹⁰

¹⁰ Sofía Vargas-Payera y Nicolás Hurtado, "From Pure Science to Applied Projects: Direct Use of Geothermal Energy in Patagonia", *World Geothermal Congress, 5*. Reykjavik, Islandia (2020).

4. Uso directo de la energía geotermal con bomba de calor geotérmica

A nivel mundial, la forma más común de aprovechar la energía geotérmica es el uso directo mediante bombas de calor geotérmicas (BCG): máquinas térmicas que transportan calor desde y hacia el subsuelo para calentar y refrigerar, respectivamente. La principal ventaja de las BCG es que se pueden implementar en todo el mundo, independiente de la cercanía a centros termales. Además, permiten generar calor y frío utilizando el suelo como una batería térmica.

La distribución de la energía térmica utilizada por categoría en el mundo (Figura 3) es aproximadamente del 58,8% para bombas de calor geotérmicas, el resto de los usos están asociados a fuentes termales o usos directos que comparten el recurso geotérmico con una planta de generación eléctrica (cogeneración). De los usos que no son BCG, el detalle es el siguiente: 18% para piscinas recreativas, natación y baños terapéuticos, 16% para calefacción de espacios, 3,5% para calefacción de invernaderos, 1,6% para aplicaciones industriales, 1,3% para estanques y canales de acuicultura, 0,4% para secado agrícola, 0,2% para derretimiento y enfriamiento de nieve y 0,2% para otras aplicaciones.¹¹

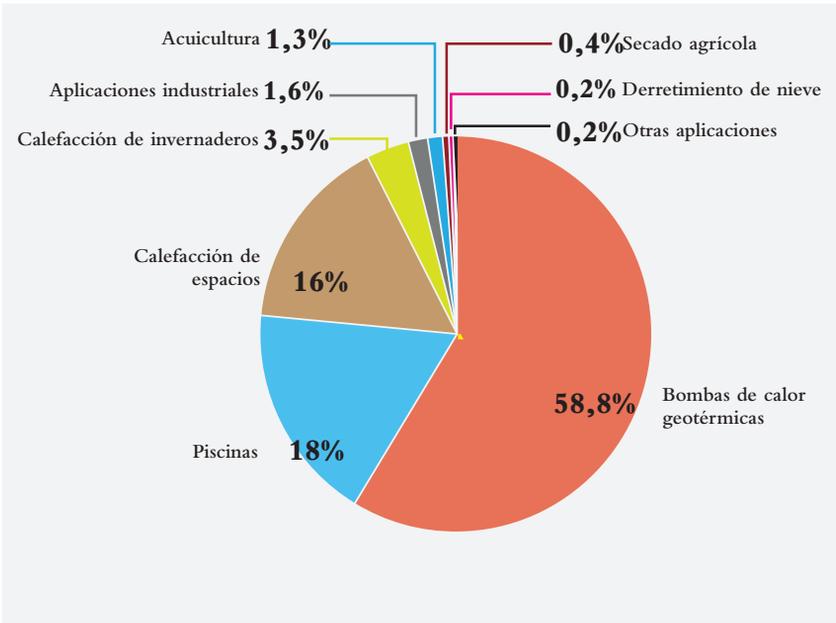


Figura 3. Distribución de la energía geotérmica utilizada por categoría, adaptada de la actualización realizada por Lund y Toth para el fin de 2019 (Lund and Toth 2020)

¹¹ John W. Lund, y Aniko N.Toth, “Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review”. *Geothermics* 90 (2021): 101915.

Dada la relevancia de la bomba de calor geotérmica dentro de los usos directos de la geotermia, en las próximas secciones se indican aspectos relevantes de su funcionamiento y ejemplos en Chile para proyectar oportunidades.

4.1. Funcionamiento de la bomba de calor geotérmica (BCG)

Una bomba de calor es un dispositivo termodinámico que transfiere calor desde un foco frío a una zona caliente con aporte de trabajo mecánico, es decir, hace lo contrario a lo que observamos habitualmente y, por eso, necesita de trabajo. Lo más común es que este trabajo sea alimentado por electricidad, aunque existen modelos que operan a gas. Un ejemplo de máquina térmica es un refrigerador, el cual extrae el calor de la comida (que está más fría que el ambiente externo) y lo libera a la cocina (que está caliente, en comparación). Por lo tanto, las bombas de calor pueden calentar una zona aprovechando la energía de un foco frío externo, o refrigerar liberando la energía a un foco caliente.

El sistema opera en base a un ciclo termodinámico cerrado de compresión/evaporación de un fluido refrigerante (fluido orgánico que se evapora a baja temperatura). El aprovechamiento de los cambios de temperatura del refrigerante, producto de los cambios de presión y el calor latente de sus cambios de fase, permite el traspaso de energía (Figura 4).

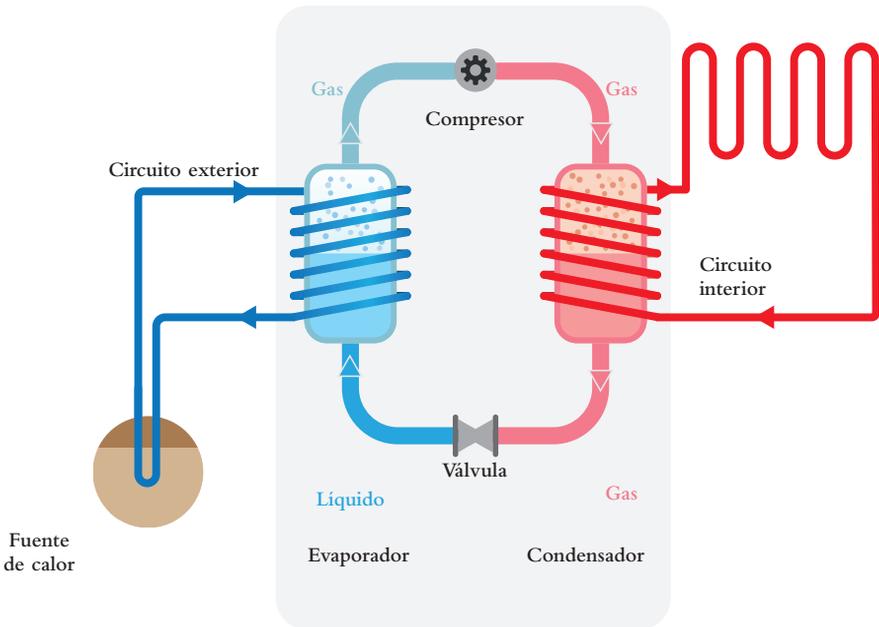


Figura 4. Esquema de funcionamiento de bomba de calor y sus componentes. Fuente: Archivo CEGA

Dependiendo de la configuración que se tenga, las bombas de calor se pueden usar para generar tanto frío como calor. Las bombas de calor son consideradas **reversibles** cuando pueden generar ambos.

La fuente externa de calor puede ser tierra o agua. El uso de tierra y agua subterránea como fuentes de calor o frío es lo que se conoce como bomba de calor geotérmica (BCG). El uso del suelo permite que las BCG tengan una mayor eficiencia que el aire acondicionado tradicional, ya que el suelo tiene una temperatura más estable a lo largo del año y sus propiedades térmicas son más favorables. Por ejemplo, mientras la temperatura del aire puede cambiar entre -2 y 30°C a lo largo del año en Chile central, la temperatura del suelo a más de dos metros de profundidad es muy cercana a la temperatura promedio anual. Es decir, está entre 13 – 15°C .

Las BCG para la climatización de espacios tienen potencias que parten desde 6 – 10 kW y ascienden sobre los 100 kW, por lo que podrían entregar soluciones a viviendas unifamiliares, a condominios (20 casas aproximadamente) o a procesos productivos significativos. Implementando sistemas en paralelo podrían abarcarse más casas, departamentos o procesos productivos grandes. Las BCG han sido utilizadas para climatizar ambientes y proveer agua caliente sanitaria, así como en procesos productivos cuyas temperaturas son compatibles con los límites de la BCG, es decir, entre -18 y 70°C .

4.2. Circuito externo: recurso geotérmico y colectores

En el caso de la bomba de calor geotérmica, la energía está contenida en las rocas, sedimentos y agua. Para obtener energía de estos recursos se requiere de un colector geotérmico, componente de la bomba de calor que transfiere calor desde y hacia el recurso geotérmico para calentar o refrigerar, respectivamente.

Las características del recurso permiten elegir el colector geotérmico más apropiado para el intercambio de calor del circuito exterior de la BCG (Figura 5). A continuación, se describen los tipos de recurso y los colectores más apropiados para cada caso.

- a. **Cuerpo de agua superficial:** puede ser un lago/laguna o el mar (Figura 5). Para cuantificar este recurso es necesario conocer su temperatura. Su gran ventaja es que es simple de caracterizar, no es necesario perforar y, por lo tanto, la etapa de exploración es rápida y de bajo costo.
- b. **Rocas:** si en el subsuelo hay rocas, entonces este recurso se aprovechará haciendo un intercambio de calor mediante una configuración del colector geotérmico de ciclo cerrado (Figura 5). Para evaluar el recurso es necesario conocer las propiedades térmicas

de las rocas, en particular la conductividad térmica o capacidad de conducción de calor de las rocas.

- c. **Sedimentos secos:** si en el subsuelo se encuentran sedimentos secos, este recurso se aprovecha haciendo un intercambio de calor en una configuración de ciclo cerrado (Figura 5). Para poder cuantificar el intercambio de calor se deben conocer las propiedades térmicas del sedimento. En general, los sedimentos secos tienen mala conductividad térmica respecto de otras unidades geológicas, como sedimentos saturados en agua o rocas. Esto sucede debido a que la matriz porosa de estos sedimentos secos está rellena de aire, que es un aislante térmico. Es importante destacar que en el caso de los sedimentos secos existe la posibilidad de construir colectores horizontales cerrados (Figura 5), los que son más abordables que un colector vertical cerrado, porque se construyen a una profundidad mucho menor.
- d. **Sedimentos saturados en agua (acuíferos):** si los sedimentos están saturados en agua, los poros estarán rellenos de agua que, a diferencia del aire, es un conductor térmico. Por lo tanto, estos sedimentos tendrán una mayor conductividad térmica y el aprovechamiento mediante un sistema cerrado sería más eficiente. Además, cuando los sedimentos son permeables (acuífero) se puede extraer agua directamente del suelo para usarlo como fuente/sumidero de calor. Esta última configuración se denomina ciclo abierto (Figura 5).

Los colectores **cerrados** consisten en circular un fluido a lo largo de tuberías enterradas en pozos horizontales o verticales, bajo el subsuelo (*slinky* o tipo malla) o sumergidos en un cuerpo de agua (*pond loop*). Los colectores **abiertos** consisten en un arreglo de pozos para extraer y reinyectar agua subterránea, o un sistema de cañerías que permiten extraer y devolver agua de un cuerpo de agua superficial (Figura 5).

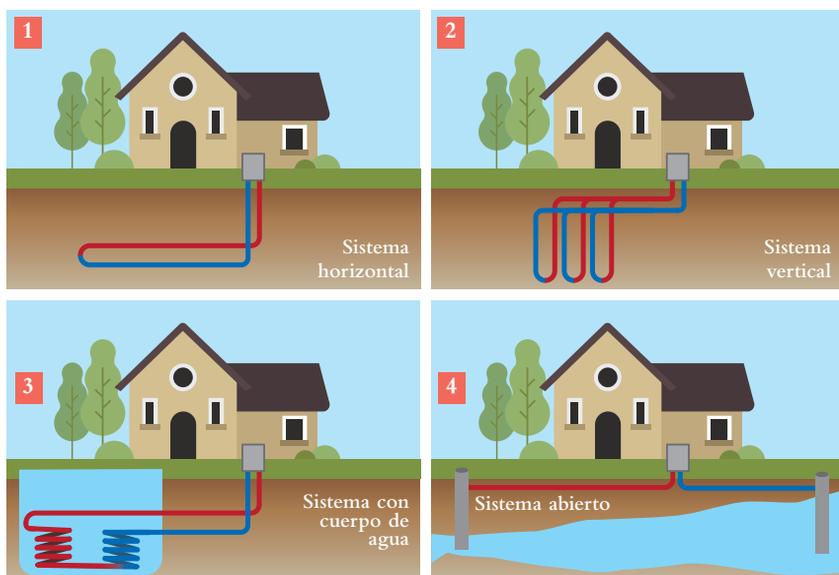


Figura 5. Tipo de colectores geotérmicos. (1) colectores horizontales enterrados entre 1 y 4 m. (2) colectores verticales cerrados, pozos normalmente entre 50 a 200 m de profundidad. (3) *pondloop*, colectores utilizando un cuerpo de agua superficial. (4) colectores verticales abierto, pozos con extracción de agua subterránea. Fuente: Archivo CEGA.

4.3. Oportunidades y ejemplos de aplicaciones de uso directo de la geotermia con BCG en Chile

La BCG puede funcionar para refrigerar hasta $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ y calefaccionar hasta $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo tanto, mediante esta tecnología es posible proveer calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria (ACS) en el sector residencial, comercial y productivo. Entre los 30 y $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura objetivo, se alcanza un excelente rendimiento del equipo o coeficiente de desempeño (*Coefficient of Performance* - COP, por sus siglas en inglés¹²). Lo anterior, en modo producción de calor. Con estas temperaturas se pueden calentar espacios hasta 18 a $22\text{ }^{\circ}\text{C}$, siempre y cuando el sistema de distribución de calor sea apropiado. La losa radiante, radiadores de baja temperatura o *fan coil*, que equivalen a un radiador con un ventilador, son sistemas de distribución apropiados para trabajar a esta temperatura.

BCG para climatización de ambientes

El frío es un tema sensible y la duración del invierno es mayor hacia el sur de Chile, por lo tanto, producir calor a bajo costo con BCG es una buena alternativa para esta zona. Además, la contaminación generada por los sistemas de calefacción tradicionales basados en leña promueve la bús-

¹² Relación entre la potencia térmica generada y potencia eléctrica requerida en el compresor de la bomba de calor. $\text{COP} = \text{vatios térmicos} / \text{vatios eléctrico}$, en el caso de las bombas de calor agua-agua el COP está entre 3 y 6, dependiendo de las temperaturas de foco frío y foco caliente. El rendimiento de la bomba de calor geotérmica en modo calefacción es al menos 25-50% mejor que un aire acondicionado convencional.

queda de alternativas sin emisiones locales, como la geotermia. En climas templados, como Santiago, por ejemplo, la ventaja de la bomba de calor geotérmica está en producir calor y frío con los mismos equipos y costos de operación más bajos que el aire acondicionado convencional.

Considerando que el mercado de las bombas de calor geotérmicas aún es inmaduro en Chile, los precios de inversión inicial son variables y, generalmente, elevados para entregar soluciones de clima y agua caliente sanitaria en viviendas unifamiliares. En este contexto y aprovechando economías de escala, la geotermia ha tenido una buena recepción en sistemas grandes (por ejemplo, colegios) y en sistemas de calefacción centralizados en condominios. A continuación, se muestran los ejemplos de climatización del Liceo Altos del Mackay en Coyhaique y del condominio Frankfurt, de Temuco, para indicar las principales características de estos sistemas.

Geotermia en el Liceo Altos del Mackay

La iniciativa calefacciona con bombas de calor geotérmicas parte del Liceo Bicentenario Altos del Mackay, ubicado en la comuna de Coyhaique, y reemplazó las combustiones lentas (estufas a leña tradicionales) presentes en las salas y una parte de la caldera a leña del colegio, aportando con un calor limpio (Figura 6). Se climatizaron 11 salas de clases, 2 baños y un pasillo, sumando cerca de 600 m², beneficiando directamente a más de 300 estudiantes.¹³ El proyecto se realizó mediante el FIC 2017 Aysén (código BIP 40000493-0), a lo que se le agregó una mejora de la aislación térmica del liceo gestionada por la Dirección de Educación Municipal (DEM) Coyhaique.

Sistema geotérmico

El colector geotérmico de la BCG es abierto con dos pozos, uno para extracción de agua subterránea y otro para la reinyección de ésta. La potencia instalada del sistema es de 50 kW_t, compuesto por dos bombas de calor, las cuales utilizan electricidad para su funcionamiento (Figura 7). La temperatura de operación del sistema es de 42 °C y se generan 40 MWh/año. Este sistema representa un ahorro de 100 m³ de leña anual, equivalente a 200 kg de material particulado.¹⁴

Antecedentes comerciales

El costo total de la implementación del sistema fue de MM\$240, mientras que el costo de la mejora de aislación fue de MM\$85.

¹³ Nicolás Hurtado, Nicolás Pérez-Estay, Pablo Valdenegro, Diego Aravena, y Diego Morata, "Implementing a Geothermal Heat Pump in a School in Coyhaique, Chile", *World Geothermal Congress 2020*, 10. Reykjavik, Islandia (2020).

¹⁴ Diego Morata, Nicolás Hurtado, Sofía Vargas, Tobías Hellwig, Juan Sáenz, Diego Aravena, Nicolás Pérez, et al., "Climatización geotérmica en una escuela de Coyhaique". Santiago, Chile (2020).



Figura 6. Sala de máquinas del Liceo Altos del Mackay. Fuente: Archivo CECA.



Figura 7. Capacitación del operador Pedro Yañez en el sistema de calefacción con geotermia. Fuente: Archivo CECA.

Geotermia en el condominio Frankfurt

El condominio Frankfurt ubicado en Temuco es el primer ejemplo en Chile de un sistema de calefacción distrital energizado con geotermia. Los datos aquí presentados son del manual de energía distrital publicado por el Ministerio de Energía en 2018.¹⁵ El sistema de distribución de calor provee calefacción y agua caliente sanitaria a 34 viviendas en un total de 5.650 m². Posee una red de distribución de 300 m de largo. Cada una de las viviendas está diseñada para ser calefaccionada con 27 kWh/m²año, lo cual es muy eficiente. Además, las temperaturas de distribución de calor son bajas, por lo que la geotermia es perfectamente compatible con el proyecto.

Sistema geotérmico

El sistema de BCG ocupa un colector geotérmico abierto. La potencia instalada del sistema es de 140 kW_t, compuesto por bombas de calor de 36 kW_e, las cuales utilizan electricidad para su funcionamiento, facilitando las instalaciones y logística de transporte energético. La temperatura de operación del sistema es de 42 °C y se generan 228 MWh/año. Este sistema representa un ahorro de 25 mil litros de diésel al año, equivalente a 69 ton de CO₂.¹⁶

Antecedentes comerciales

El costo total del sistema de generación de calor es \$98.528.000, mientras que el costo del sistema de distribución de calor es de \$49.264.000. Con lo anterior, el costo del proyecto fue de 0,85 UF/m², muy por debajo de los costos de un sistema individual de calefacción y agua caliente sanitaria (ACS).

BCG en el sector productivo

La geotermia de uso directo mediante BCG en procesos productivos depende de los niveles de temperatura requeridos en el proceso productivo y su factor de utilización. Los procesos productivos más beneficiados por la geotermia son aquellos en que el requerimiento energético es intensivo y, por lo tanto, requieren de una fuente de calor estable. A modo de ejemplo, en este apartado se muestran los casos en la viña Maquis y celulosa Arauco.

Geotermia en Viña Maquis

La viña Maquis es la primera viña de Chile en beneficiarse de la energía geotérmica a través del uso de BCG. Esta tecnología le permite controlar la transferencia y acumulación de calor para diversos procesos, y su operación ha demostrado ser tres veces más eficiente que los métodos de calefacción y enfriamiento tradicionales, sobre todo cuando hay simultaneidad en los requerimientos de frío y calor.

¹⁵ Ministerio de Energía, "Mesa de Geotermia: Rol de la geotermia en el desarrollo de la matriz eléctrica chilena". Santiago, Chile (2018).

¹⁶ Ministerio de Energía, "Manual de Energía Distrital Diciembre". Santiago, Chile (2018).

La viña Maquis cuenta con 140 Ha plantadas de diferentes variedades nobles, situadas en la comuna de Palmilla, en el Valle de Colchagua, con climas mediterráneo y continental. Si bien la viña data de 1916, a partir del año 1997 comenzó un proceso de modernización. Durante el año 2013 se procesaron dos mil toneladas de uvas para producción de vinos finos, en las áreas de embotellado y graneles.

Utilización de la geotermia

La geotermia se utiliza para generar frío y calor, entre los 40 °C y 5 °C, por lo cual puede cumplir las funciones tanto de caldera como de refrigerador; permitiendo alimentar el sistema de aire acondicionado, suministrar agua caliente para el lavado de barricas y regular la temperatura de las cubas de acero inoxidable.

Antecedentes comerciales

En la viña las bombas de calor geotérmicas permitieron reemplazar el uso de la caldera a gas y del chiller eléctrico, lo que se traduce en un 90% de ahorro en gas y un 30% de ahorro en energía eléctrica. El proyecto tuvo un costo de CLP MM\$ 222 (USD M\$ 275) y contó con el cofinanciamiento de la Fundación para la Innovación Agraria (FIA), entidad que aportó con el 60% de los recursos. La vida útil del proyecto es de 25 años.

Forestal Arauco

El proyecto consiste en entregar climatización a los viveros, donde germinan las semillas y crecen las plantas que se transformarán posteriormente en árboles. El proyecto contempla una generación térmica completamente renovable mediante bombas de calor geotérmicas y paneles solares. Dadas las características en la zona de instalación, y por contar con recursos freáticos suficientes, se optó por un tipo de captación abierta a un cuerpo de agua superficial.

Los viveros con geotermia de Arauco están situados en la comuna de Laraquete, en la costa del centro-sur de Chile. Esta comuna tiene un clima mediterráneo. La temperatura promedio anual es 12 °C, con máximas y mínimas de 16,5 °C y 8 °C, registradas en los meses de diciembre y junio, respectivamente.

Utilización de la geotermia

Este proyecto consta de 700 kW_t a partir de bombas de calor geotérmicas (siete unidades) y 300 kW_t de apoyo con paneles solares. La energía es utilizada para cultivar plantas madre. El calor se distribuye mediante una red de tuberías PEX que transporta agua a 40 °C, lo cual permite mantener una temperatura de sustrato de aproximadamente 28 °C, temperatura ideal para el crecimiento y cuidado de las plantas.

Antecedentes comerciales

Este proyecto, permitió incrementar sobre un 20% la tasa de crecimiento en las plantas madre de producción de eucaliptus en siete invernaderos de 2.100 m² cada uno, cubriendo un área total de 14.700 m². En este pro-

yecto, la generación de calor mediante geotermia representa ahorros sobre el 75% respecto a sistemas tradicionales.

5. Uso directo de la geotermia en zonas con anomalía termal

Los primeros usos de la geotermia en la historia de la humanidad son usos directos de la energía en fuentes termales, donde el agua presente en la superficie supera los 30 °C. El primer uso informado de energía geotérmica data de ~11.000 años antes de Cristo, cuando los habitantes del territorio que hoy día es Japón usaban aguas termales para bañarse y lavar ropa.¹⁷ También en Chile los primeros recuentos de usos directos tienen relación con las fuentes termales, como se muestra en el capítulo I.

El uso directo de los recursos geotérmicos a una escala significativa se inició a finales del siglo XVIII, cuando el vapor del suelo se utilizó para extraer ácido bórico del lodo volcánico cerca de la ciudad de Larderello, en la Toscana de Italia. Desde entonces, el uso directo de la energía geotérmica en zonas con anomalías termales, como son las aguas calientes, ha tenido diversos usos en el sector productivo y residencial.¹⁸

5.1. Oportunidades y ejemplo de aplicaciones del uso directo de la geotermia con fuente termal en Chile

En Chile hay más de 300 áreas con fuentes termales,¹⁹ la gran mayoría de ellas asociadas al volcanismo activo. En la mayoría de los casos el uso de las fuentes termales se limita a baños termales. No obstante, hay ejemplos de utilización para climatizar espacios y procesos productivos de escala menor. A continuación, se mencionan algunos ejemplos destacables.

- **Uso de fuentes termales para climatizar espacios**

En Chile este uso de geotermia está implementada en algunas instalaciones hoteleras que aprovechan fuentes termales. Destacan las termas de Malleco en la Araucanía y las termas de Puyuhuapi en Aysén. En ambos casos, los principales beneficios de climatizar las instalaciones con geotermia son la no emisión de gases de efecto invernadero y de material particulado, además de la reducción de costos de operación asociados al sistema de calefacción. En este sector existen oportunidades en la renovación y construcción de nueva infraestructura en las fuentes termales.

¹⁷ Mitsuru Sekioka, "Japanese Geothermal Waters through History" en *Stories from a Heated Earth: Our Geothermal Heritage*, editado por R. Cataldi, S.F. Hodgson, and J.W. Lund. (Davis, California: Geothermal Resources Council and International Geothermal Association, 1999): 393–406.

¹⁸ Ingvar Fridleifsson, "Geothermal Energy for the Benefit of the People", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 5 (3) (2001): 299–312.

¹⁹ Diego Aravena, Mauricio Muñoz, Diego Morata, Alfredo Lahsen, Miguel Ángel Parada y Patrick Dobson, "Assessment of High Enthalpy Geothermal Resources and Promising Areas of Chile", *Geothermics* 59 (2016).

- **Uso de fuentes termales para procesos productivos**

En la localidad rural de Liquiñe, comuna de Panguipulli, existe un proyecto del uso de fuentes termales para procesos productivos. El proyecto “Implementación de un piloto de uso directo de geotermia con enfoque productivo para la zona cordillerana de la Región de los Ríos” tuvo como objetivo principal diseñar e implementar el primer invernadero y secador de productos agrícolas calefaccionado con una fuente termal en Sudamérica (Figura 8).



Figura 8. Fotos del invernadero de Liquiñe en el invierno de 2021. Fuente: Archivo CEGA.

La iniciativa tiene un enfoque en el desarrollo económico local y el beneficio de la comunidad. El proyecto se estructuró de manera interdisciplinaria en torno a cuatro dimensiones de trabajo: (1) Una exploración geocientífica profunda permitió identificar y calcular el potencial geotermal de la zona, (2) un diseño ingenieril enfocado en la simpleza, eficiencia y durabilidad permitió construir exitosamente el prototipo, (3)

la construcción de un modelo de negocios permitirá replicar la iniciativa y (4) el desarrollo de la dimensión social permitió ejecutar estrategias de apropiación tecnológica, acompañamiento, transferencia tecnológica y sensibilización comunitaria.

Una de las premisas fue implementar un proyecto simple de utilización de fuentes termales con una tecnología que permitiera la escalabilidad y replicabilidad en sitios con fuentes termales similares. El sistema consiste en acumular agua de la fuente termal en una piscina de concreto para luego trasladar el agua caliente hacia el invernadero. Posteriormente, se traslada calor hacia un secador de productos agrícolas, utilizando la temperatura de la fuente termal en cascada (Figura 9).

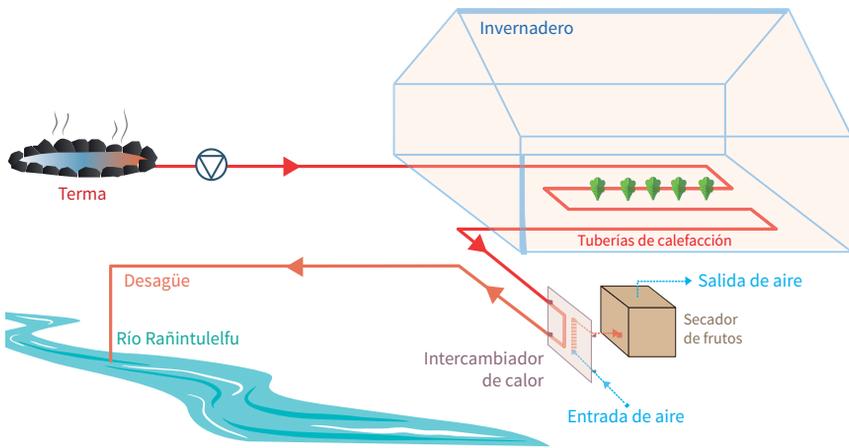


Figura 9. Diagrama del sistema geotérmico del invernadero de Liquiñe. Fuente: Archivo CEGA.

6. Generación eléctrica

El interés inicial de desarrollar la geotermia a gran escala en Chile tuvo relación con la generación de electricidad en sitios con fuentes termales cercanos a volcanes activos. Desde la prospección realizada por un grupo de colonos italianos en el Tatio, pasando por las exploraciones encargadas por el gobierno chileno y los esfuerzos del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo en la década de los 70 (ver capítulo VI), y en las cercanías de 2010, cuando un importante número de empresas exploraron áreas de interés geotermal en el país. Chile cuenta desde 2017 con una planta geotérmica en funcionamiento, Cerro Pabellón.

Sin embargo, los desarrolladores han perdido interés por desarrollar la geotermia para generar electricidad debido a los bajos precios de otras alternativas renovables. A pesar de esto, los recursos geotérmicos de alta temperatura seguirán activos, como ha sido a lo largo de miles de años, es-

perando el momento en que el desarrollo del país requiera geotermia para garantizar un crecimiento sostenible y amigable con el medio ambiente.

Más allá de la situación actual de la geotermia para generar electricidad, Chile es un país con un recurso geotérmico generoso. Por este motivo, a continuación, se abordan tópicos que tienen directa relación con la generación eléctrica a partir de la geotermia: el recurso, formas de utilización y proyecciones para generar electricidad con geotermia en Chile y el mundo.

6.1. Recurso geotermal de alta temperatura

La factibilidad de generar electricidad con geotermia debe considerar aspectos técnicos, económicos, ambientales y sociales, además del recurso geotermal. La conveniencia de explotar el recurso geotermal para generar electricidad, desde un punto de vista técnico, dependerá de la cantidad de energía (volumen y temperatura del reservorio), la geometría de las unidades permeables y la conexión con recursos de agua (superficiales y subterráneos). Lo anterior está relacionado a las fuerzas de la naturaleza que moldearon la Tierra de una forma particular.

Los elementos que definen el recurso geotermal son comunes: la fuente de calor, la disponibilidad de agua para recargar el sistema y la permeabilidad en la roca, o fracturas que permitan la circulación de agua y vapor en el reservorio geotermal y lo conecten con la superficie. Los aspectos de forma, tamaño o profundidad son únicos de cada sistema geotermal y, si bien se pueden estandarizar para definir tipos específicos de reservorios geotérmicos, a la escala de las instalaciones de la planta geotermal, son únicos. Los aspectos comunes al recurso geotermal en el caso de los Andes chilenos se abordan detalladamente en el capítulo II y son importantes, porque permiten guiar la exploración en direcciones que son más favorables. La Figura 10 muestra un esquema simple del recurso, el cual en la gran mayoría de los casos está asociado a volcanismo activo y áreas en las cuales las condiciones geológicas permiten la infiltración, almacenamiento y ascenso de fluidos geotermiales.²⁰

²⁰ Fraser Goff y Cathy J. Janik, "Geothermal Systems", en *Encyclopedia of Volcanoes*, editada por H. Sigurdsson, B. Houghton, S. McNutt, H. Rymer, and J. Stix, First. (San Diego: Academic Press, 2000): 817–34.

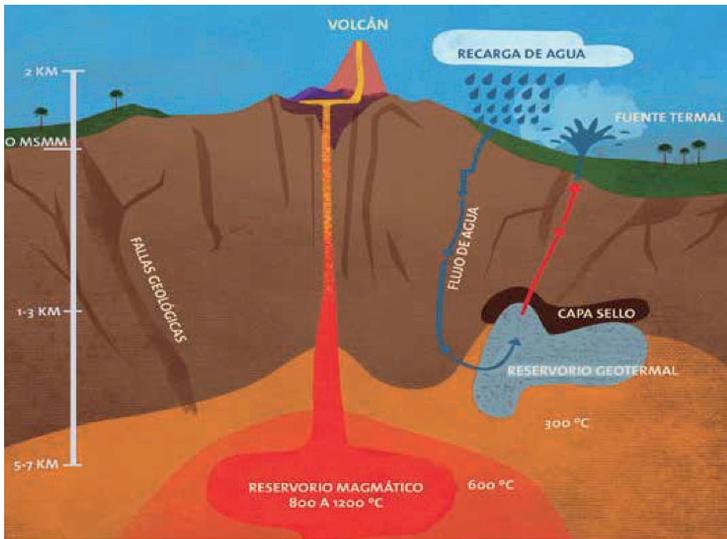


Figura 10. Esquema del recurso geotermal de alta temperatura. Fuente: Archivo CEGA.

6.2. Consideraciones ambientales

Los impactos potenciales del desarrollo de la energía geotérmica dependen de las actividades de perforación, la construcción de instalaciones y la tecnología de la planta de energía aplicada. Entre los impactos más importantes del desarrollo de la energía geotérmica se encuentran los siguientes:

- Emisiones gaseosas de gases no condensables. Los gases más comunes son el dióxido de carbono (CO_2), el sulfuro de hidrógeno (H_2S) y otros gases de baja concentración como el metano, el hidrógeno, el dióxido de azufre y el amoníaco.
- La contaminación del agua. Los minerales disueltos (por ejemplo, boro, mercurio y arsénico) contenidos en fluidos geotermales pueden afectar las aguas superficiales o subterráneas y dañar la vegetación local.²¹ Por lo tanto, es importante monitorear los pozos durante la perforación y operaciones posteriores para detectar fugas rápidamente.
- La contaminación acústica. Las fuentes primarias de ruido están asociadas con actividades de exploración como las fases de perforación, estimulación y prueba de pozos. Los niveles de ruido disminuyen rápidamente al aumentar la distancia desde la fuente.²²

²¹ Jefferson W. Tester, Brian J. Anderson, A. S. Batchelor, D. D. Blackwell, Ronald DiPippo, E. M. Drake, J. Garnish, B. Livesay, M. C. Moore y K. Nichols, *The Future of Geothermal Energy* (Massachusetts Institute of Technology 358, 2006).

²² *Ibíd.*

El desarrollo de la energía geotérmica también puede tener impactos en los recursos agrícolas y el ambiente cuando las actividades de construcción destruyen o dañan la vida silvestre, alteran los patrones de reproducción y migración, y reducen la calidad del hábitat y la diversidad de especies.

6.3. Funcionamiento

Existen dos áreas esenciales para el funcionamiento sostenible de una planta geotermal. Por un lado, la administración del recurso geotermal, que consiste en la extracción y reinyección de fluido geotermal, en una cantidad tal que se mantiene la presión y temperatura en el reservorio, evitando así su agotamiento. Esto se hace mediante un arreglo de pozos de extracción y reinyección que conectan la planta de generación eléctrica con el reservorio geotermal. Por otro lado, está la planta de generación eléctrica, la cual transforma el fluido geotermal en electricidad. El fluido geotermal es una mezcla de vapor y agua a alta temperatura y presión, que se separa en agua y vapor. Posteriormente, el vapor se expande en la turbina generando el movimiento que se transforma en electricidad. Finalmente, el agua separada antes de ingresar a la turbina y el vapor condensado luego de atravesar la turbina se reinyectan al reservorio geotermal.²³

Administración del recurso geotermal

Para la administración de reservorio geotermal es necesario comprender el flujo de los fluidos geotermales a través de todo el sistema geotermal (modelo conceptual). A partir de este entendimiento se construyen modelos numéricos que permiten anticipar el funcionamiento del sistema geotermal. Con esta información se gestiona eficazmente la producción e inyección de esos fluidos.

Considerando la naturaleza compleja de los sistemas geotermales, los modelos se actualizan y mejoran con la operación del campo. Esta tarea es compleja, porque nadie puede estar seguro de lo que realmente ocurre en el reservorio geotermal. Por ejemplo, cómo se conectan las fracturas con la porosidad de las rocas y cómo, a través de esta permeabilidad, circula el fluido geotermal. Incluso si eso fuera posible por un momento, los patrones de flujo probablemente cambiarían con el tiempo, porque un sistema geotermal es dinámico. De hecho, se generan y cierran fracturas, al mismo tiempo que se forman minerales mientras otros se disuelven.

El modelo conceptual se construye a partir de la exploración del recurso y la experiencia de otros campos geotermales similares. Este modelo

²³ Ronald DiPippo, "Part 1. Resource Identification and Development", en *Geothermal Power Plants* (Third Edition), editado por Ronald DiPippo, 1-2. (Boston: Butterworth-Heinemann, 2012).

conceptual debe integrar todos los aspectos relativos al reservorio geotermal: zonas de recarga, fuente de calor, geometría del reservorio, así como de la capa sello, entre otras cosas. Con lo anterior, se anticipan los flujos del fluido geotermal y, entonces, se planifican los pozos de extracción y reinyección para garantizar la sostenibilidad del recurso. A partir del modelo conceptual y toda la información de la exploración y pozos exploratorios y productivos, se construye un modelo numérico que incluye todas las variables que son relevantes para planificar la operación del campo geotermal. La interrelación entre el modelo conceptual y numérico, y su evolución en la medida que se genera más información, requieren del trabajo coordinado de diversos ingenieros y geólogos.

Plantas geotermiales

La segunda parte de la generación eléctrica es el sistema de conversión de energía que toma los fluidos geotérmicos de los pozos de producción, para producir electricidad en una planta de energía y, finalmente reinyecta los fluidos geotermiales al reservorio. Los sistemas tradicionales generan vapor por descompresión *flash* para mover las turbinas. Además, existen plantas que traspasan la energía a un segundo fluido con bajo punto de ebullición (usualmente un hidrocarburo) que se encarga de mover las turbinas. Al trabajar con dos fluidos (geotermal y de trabajo), este segundo tipo de planta geotermal se llama binaria.

Plantas de descompresión *flash*

Los pozos geotérmicos producen una mezcla de vapor y líquido, el *flash* es el proceso en el cual se separa el vapor del líquido, porque en las turbinas solo se ocupa el vapor. Este proceso en que se separan las fases de vapor y líquido se lleva a cabo asegurando una pérdida mínima de presión. El *flash* se realiza en un recipiente cilíndrico a presión ciclónico, generalmente orientado con su eje vertical, donde las dos fases se desconectan debido a su diferencia de densidad. El vapor separado del agua ingresa a la turbina y su expansión genera el flujo que produce movimiento, el cual se transforma en energía. Una vez que el vapor genera el trabajo, se condensa y se reinyecta al reservorio junto con el agua separada, antes del paso por la turbina.

Plantas binarias

Las centrales geotermiales de ciclo binario son las más cercanas en principio termodinámico a las termoeléctricas convencionales energizadas con combustible fósil o plantas termonucleares, ya que el fluido de trabajo se encuentra en un ciclo cerrado. El fluido de trabajo, elegido por sus propiedades termodinámicas apropiadas, recibe calor del fluido geotermal, se

evapora, se expande a través de una turbina, se condensa y se devuelve al evaporador por medio de una bomba hidráulica.

Las plantas binarias son las más abundantes en el mundo de la geotermia. Tienen la ventaja de poder trabajar con temperaturas menores con respecto a las plantas de descompresión simple. Además, garantizan un mejor manejo del volumen de fluido geotermal que solo se ocupa para transferir calor al fluido binario. Entonces, cuidan de mejor manera el recurso geotermal. La planta geotermal que hoy existe en Chile, Cerro Pabellón, es justamente una planta de ciclo binario.

6.4. Proyecciones para el desarrollo de la generación eléctrica con geotermia en Chile

A continuación, se presentan cifras de utilización de geotermia en Chile y el mundo. Además, se indica la proyección de utilización de geotermia en Chile, destacando los proyectos con mayor avance y una estimación de largo plazo.

Generación eléctrica geotérmica actual en el mundo y Chile

La potencia instalada de generación eléctrica mediante geotermia en el mundo es de 15.950 MW_e (~16 GW_e), lo cual representa un aumento de aproximadamente un 27% respecto a 2015. Los países con mayor producción de electricidad mediante geotermia son Estados Unidos, Indonesia, Filipinas, Turquía, Nueva Zelandia, México, Italia, Kenia, Japón y Costa Rica.²⁴ En el caso de Chile, se producen 81 MW_e en la planta geotermal de Cerro Pabellón, la cual es operada por Geotérmica del Norte (GDN).²⁵

Potencial de generación eléctrica geotérmica en Chile (posibles proyectos futuros)

La utilización de más recurso geotermal en Chile, así como en el mundo, depende de diversos factores, entre los que destacan aspectos técnicos, económicos, ambientales, sociales y políticos. En Chile destacan dos proyectos geotermiales con alto grado de avance y buenas posibilidades de ser desarrollado en el plazo de cinco años:²⁶

- a. Proyecto Mariposa, en Chile central, el cual está siendo desarrollado por la empresa filipina Energy Development Corporation (EDC). A pesar de que el proyecto se encuentra suspendido, los resultados de la exploración sugieren un potencial de 160 MW.

²⁴ Gerald W. Huttner, "Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report", *World Geothermal Congress, 17*. Reykjavik, Islandia (2020).

²⁵ Diego Morata, Diego Aravena, Alfredo Lahsen, Mauricio Muñoz y Pablo Valdenegro, "Chile Up-Date: The First South American Geothermal Power Plant After One Century Of Exploration", *World Geothermal Congress, 14*. Reykjavik, Islandia (2020).

²⁶ Gerald W. Huttner, "Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report", *World Geothermal Congress, 17*. Reykjavik, Islandia (2020).

- b. El proyecto Adobera es del tipo Pequeño Medio de Generación Distribuida, PMGD, con una capacidad máxima de 9MW, desarrollado por el consorcio Adobera Spa en las comunas de Quilaco y Curacautín.

En 2018, el informe de la Mesa de Geotermia, presentado por el Ministerio de Energía de Chile, presenta como principales conclusiones que para 2030 y 2050 la potencia instalada de geotermia en Chile podría llegar a 599 y 1487 MW, respectivamente.²⁷

A pesar de una política gubernamental optimista con respecto al mayor desarrollo de la energía geotérmica, es poco probable que el enorme potencial de Chile sea desarrollado hasta que no se aborden las barreras económicas (principalmente los precios muy bajos de la electricidad).²⁸

Un caso particular y de alto interés es el proyecto “Factibilidad de cogeneración geotérmica en Puyuhuapi”, que consiste en precisar el recurso geotérmico, determinar la factibilidad de la iniciativa y construir una hoja de ruta para la producción de calor y electricidad con geotermia en Puyuhuapi. Esta iniciativa es desarrollada por el Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) y financiada por el Gobierno Regional de Aysén a través de un Fondo de Innovación para las Competencias (código BIP-40010311-0). Es destacable el interés del Gobierno Regional de Aysén por buscar alternativas de energías renovables y locales para garantizar un desarrollo sostenible de localidades aisladas geográficamente, pero con un altísimo potencial de desarrollo (ver capítulo VIII).

7. Conclusión

En Chile existe un gran potencial para utilizar la geotermia, tanto de forma directa como para la generación de electricidad. Existen en Chile más de 300 áreas con fuentes termales que dan cuenta del recurso geotérmico asociado a anomalías termales, generadas principalmente por el volcanismo activo, y que permite implementar usos directos de la energía y producción de electricidad. Además, es posible implementar geotermia en cualquier lugar del país con bomba de calor geotérmica.

Los proyectos de uso directo tienen el potencial de implementarse con inversiones significativamente menores que las requeridas para la generación de electricidad. De la experiencia aplicada es evidente que para que los proyectos sean factibles deben considerarse el contexto político, legal y ambiental, además de aspectos técnicos, económicos y sociales. En términos técnicos, es clave considerar los límites de temperatura que se pueden

²⁷ Ministerio de Energía, “Mesa de Geotermia: Rol de la geotermia en el desarrollo de la matriz eléctrica chilena”. Santiago, Chile (2018).

²⁸ Gerald W. Hutterer, “Geothermal Power Generation in the World 2015–2020 Update Report”, *World Geothermal Congress, 17*. Reykjavik, Islandia (2020).

obtener a partir de las bombas de calor y fuentes termales a la hora de implementar proyectos de uso directo de la geotermia.

Finalmente, en cuanto a la generación de electricidad, Chile tiene unos de los potenciales de generación eléctrica más favorables no desarrollados en el mundo. Actualmente, su utilización es postergada por las buenas cualidades de otras energías renovables que, de igual manera, contribuyen a construir un mundo mejor. A pesar de esto, los recursos geotérmicos de alta temperatura seguirán activos, como ha sido a lo largo de miles de años, esperando por el momento en que el desarrollo del país requiera geotermia para garantizar un crecimiento sostenible y amigable con el medio ambiente.

CAPÍTULO IV

Cerro Pabellón, primera planta geotérmica de Sudamérica: el dulce despertar de un sueño y el inicio de una nueva era

Diego Morata

1. Introducción

La planta geotérmica Cerro Pabellón, que opera en el norte de Chile desde 2017, se transformó en una luz de esperanza en el largo camino de promoción del uso de esta energía en el país. ¿Cómo es? ¿Cuál es la historia detrás de esta planta pionera en Sudamérica? ¿Cómo ha sido el camino recorrido por distintos proyectos geotérmicos en Chile? ¿Qué ha significado Cerro Pabellón para el desarrollo científico? Estas son algunas de las preguntas que responde este capítulo.

Gracias a conversaciones y revisión de documentos publicados en diferentes medios y plataformas, en las siguientes páginas entregamos una descripción del proceso que dio vida a este proyecto tecnológico que ha marcado la historia reciente de la geotermia en el país.

Para conocer cómo surge este proyecto, partiremos con una revisión del camino que los proyectos geotérmicos que han intentado desarrollarse en Chile recorrieron durante las últimas décadas. Haremos un especial énfasis en exponer cómo la carrera por encender la primera ampolleta con geotermia —que fue ganada por la alianza ENEL y ENAP, a través de la empresa Geotérmica del Norte (GDN)— fue un proceso que no estuvo exento de altos y bajos. Para llegar a ese punto, tenemos que partir con cómo comenzó el interés por promover la geotermia en Chile, retroceder unos 100 años, y movernos de continente.

Situémonos en Italia en 1904, cuando el príncipe Piero Ginori Conti genera 29 KW con una vieja máquina a vapor, procedente de las manifestaciones geotermales de Larderello, y utiliza esa electricidad para alimentar la incipiente área industrial y algunos motores eléctricos del sector. Así se inicia la perforación de pozos para extraer vapor, el que fue usado como energía mecánica en industrias textiles del complejo geotérmico y, posteriormente, para producir electricidad. En los albores del siglo XX, en el año 1913, se instala en esa localidad italiana la primera unidad de 250 KW eléctricos (Figura 1). Este hito marcó el inicio de la era geotérmica mundial, con instalaciones pequeñas, pero confirmando que era posible generar electricidad mediante esta fuente de energía renovable.

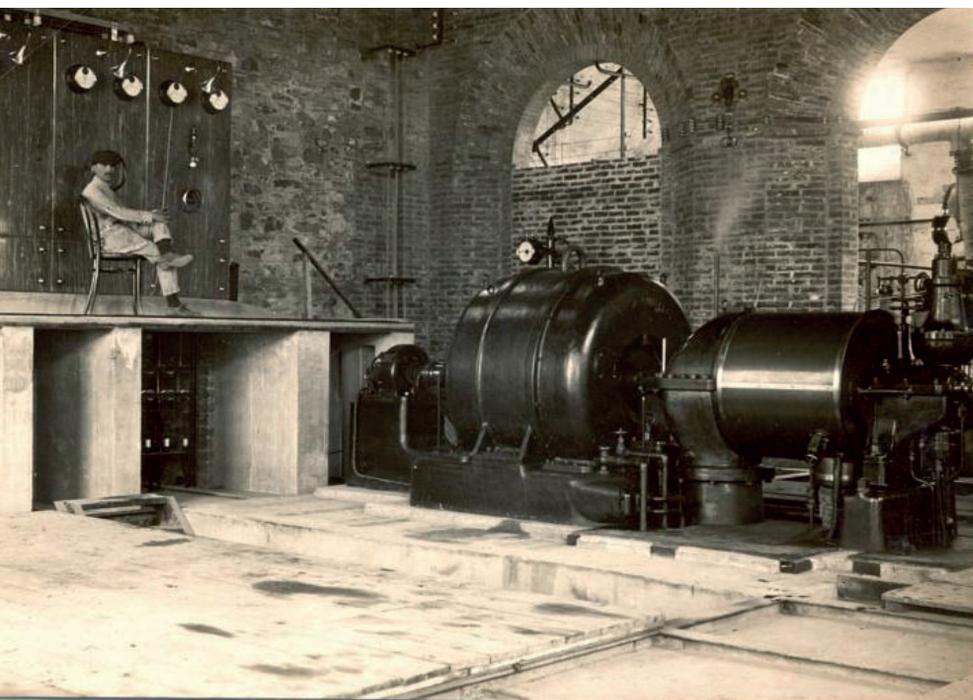


Figura 1. Primera planta geotérmica comercial alimentada con vapores geotermiales en Larderello (Italia), con una capacidad de generación de 250 KW eléctricos (tomado de Luzzini, F, 2012).

La construcción de pozos en Larderello no fue una experiencia única y aislada, sino que fue acompañada de exploraciones en otras partes del mundo. En el año 1919 se perforaron los primeros pozos geotermiales en Beppu (Japón) y, en 1921, en la zona de The Geysers (California, EEUU). Por los mismos años, también en El Tatio (Chile), los dos pozos someros (100 m) perforados en la Región de Antofagasta marcan el inicio de la aventura geotérmica en el continente sudamericano.

Hace ya más de un siglo que aquella primera aventura geotérmica en Italia tuvo su eco por nuestras latitudes. En efecto, a comienzos del siglo pasado llegó a Chile un grupo de italianos de Larderello Spa a analizar por primera vez el potencial geotérmico del país, en la zona de El Tatio. Fue un informe publicado por el ingeniero Ettore Tocchi, en 1923, en el que —con la información que se disponía en esa época— se establecía la posibilidad de instalar una central de generación de electricidad mediante geotermia capaz de producir 50.000 KW eléctricos.

Realmente se puede decir que en ese momento Chile estaba en la avanzada de la geotermia mundial. Solo Italia, Japón y EE.UU. habían perforado el subsuelo en busca del recurso energético que hay bajo nuestros

pies. Y, en apenas 30 años, Larderello pasó de ser una primera experiencia de generación de electricidad, a tener instalado un total de 127.650 KWe en 1942, lo que impulsó que varios otros países se animasen a explorar esta forma sustentable de generación de electricidad.

Mirando en retrospectiva, es interesante instalarnos en el escenario “¿qué hubiese pasado si...?” Esto, porque cuando el informe de Tocchi apuntaba a que se podrían generar hasta 50 MWe en El Tatio, en el mundo apenas había una planta de 250 KWe instalada en Larderello. Si Chile hubiese considerado esos estudios en esos primeros años del siglo pasado, y hubiese optado por desarrollar la energía geotérmica, posiblemente muchos de los problemas asociados a la actual debilidad energética que sufre la matriz nacional no existirían. Si hubiese sido así, quizás Chile sería una potencia mundial en el desarrollo de la geotermia. Pero eso no ocurrió, y para no llorar sobre la leche derramada, mejor volvamos a cómo distintos eventos fueron parte de la historia de la geotermia en Chile y la primera planta geotérmica de Sudamérica.

Claramente, esa quimera, esa visión moderna (y quizá demasiado adelantada para su época) de proyectar generar electricidad con geotermia en Chile, no cuajó. Fueron diferentes vaivenes los que sufrió la geotermia en nuestro país y continente. De hecho, como vimos en el capítulo II: “Exploración geotérmica en Chile”, el Estado chileno comisionó estudios exploratorios y algunos académicos realizaron investigaciones, no obstante, estas actividades no lograron repercusiones importantes. Tuvieron que pasar más de cuatro décadas para retomar la exploración geotérmica en el país de mayor envergadura, no obstante, las actividades previas pueden haber contribuido a esta nueva etapa. Así, en 1967 se firma un acuerdo entre la CORFO y el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) para realizar estudios de geología, geoquímica y geofísica, fundamentalmente en el norte del país, y con la asesoría de expertos extranjeros. Estas investigaciones buscaban estimar el potencial geotérmico y la factibilidad de desarrollo de electricidad mediante este recurso. En esos años de los 60, ya se generaba electricidad con geotermia en Italia, Japón, Nueva Zelanda, México y EE.UU., entre otros pocos países, siendo 520 MWe la capacidad instalada a nivel mundial a finales de 1965.¹ Una vez más, Chile estaba en el tren de avanzada del desarrollo de la geotermia.

Gracias a la alianza con las Naciones Unidas, durante el período 1969-1973 se perforaron en el sector de El Tatio un total de 13 pozos, seis pozos delgados (*slim holes*), de unos 600-750 m de profundidad, y siete pozos productores con profundidades entre 870-1820 m. En tres de estos pozos

¹ Ruggero Bertani, “Geothermal power generation in the world 2005-2010 update report”, *Geothermics* 41 (2012): 1-29.

se llegó a estimar un potencial de 16 MWe. Cabe mencionar que para 1970, la capacidad global de generación de electricidad mediante geotermia instalada era de 720 MWe.² El mundo veía en este recurso geotérmico una importante forma de generar electricidad, y Chile no estaba ajeno a esa visión. Pero llegó 1973, el año que cambió la historia reciente de nuestro país, y como se verá en el capítulo VI, la geotermia no fue ajena a los dramáticos cambios que sufrió el país y fue paulatinamente desapareciendo del discurso político y ecosistema energético de Chile.

Esta situación fue similar en el resto de los países andinos. En Argentina se llegó a construir una pequeña planta de generación de electricidad en Copahue. Fue un intento de comenzar el desarrollo de la geotermia en el país vecino, implementando una planta de 0.76 MWe que fue abandonada en 1995. Incluso durante un tiempo se usaron los fluidos geotermiales de este campo para calefaccionar la localidad de Copahue. ¡Se podría decir que fue la primera iniciativa a nivel continental de calefacción distrital con geotermia! Pero también se abandonó por problemas de incrustaciones minerales en las tuberías. Una vez más, buenas ideas, pero intentos fallidos por falta de una planificación desde el Estado.

Siguiendo este relato cronológico de la evolución de la geotermia en nuestro país, a finales del siglo XX Chile se vio enfrentado a un serio problema energético. La sequía que sufrió la zona central en 1998-1999, sumado al corte de suministro de gas natural procedente de Argentina, mostró la debilidad de la matriz energética de nuestro país y se hizo necesario buscar nuevas fuentes de energía, con una mirada hacia las fuentes renovables. De esta forma, en enero del 2000 entró en vigencia la Ley n° 19.657 sobre Concesiones de Energía Geotérmica, permitiendo el otorgamiento de concesiones de exploración y explotación al mundo privado. Comenzó una época vibrante en lo que respecta a la exploración geotérmica. En 2014, había un total de 75 áreas concesionadas para exploración geotérmica en Chile, ocho para explotación, habiendo además 56 concesiones de exploración y 20 de explotación pendientes de aprobación por parte de la autoridad. 16 diferentes empresas geotérmicas estaban instaladas en el país y se hablaba incluso de una suerte de “fiebre del oro de la geotermia”. Se instauró la Asociación Chilena de Energía Geotérmica (ACHEGEO), que agrupaba a una serie de empresas de exploración y desarrolladores geotérmicos, y el Consejo Geotérmico, conformado originalmente por las empresas Enel Green Power, Energía Andina, EDC, Magma Energy, Mighty River Power, Ormat y Transmark Renewables. Este Consejo Geotérmico llegó a proponer, en esos años, que el potencial geotérmico que se podría instalar en un intervalo de 20 años oscilaba entre los 1000 a 2440 MWe.

² *Ibid.*

Como referencia, a finales del 2015 la capacidad de generación de electricidad mediante geotermia instalada a nivel mundial era de 12729 MWe.³

Es interesante recordar que tres décadas antes de ese potencial geotérmico indicado por el Consejo Geotérmico, el profesor Alfredo Lahsen publicó un estudio en donde se indicaba que el potencial geotérmico de Chile sería del orden de 16000 MWe durante 50 años, desarrollados a partir de fluidos geotermiales con temperaturas sobre los 150 °C y localizados a profundidades menores de los 3000 m.⁴ Si uno toma en cuenta las proyecciones más conservadoras del Consejo Geotérmico, ya en 2015 se indicaba que Chile podría producir casi un 10% del total de la energía eléctrica que a nivel mundial se generaba con geotermia. Eran cifras muy alentadoras, y con ese panorama —y un precio de la electricidad muy alto— se pensaba en un gran desarrollo de la industria geotérmica en Chile. Se llegó a decir que éramos “la Arabia Saudí de la geotermia”.

No obstante, nuevas barreras impidieron un desarrollo creciente de la geotermia. Encontrar un recurso geotérmico no es una labor fácil y con poco apoyo del Estado, poco a poco las empresas que estaban instaladas en Chile fueron abandonando sus proyectos. Es cierto que hubo mucha especulación en esa época, pero las condiciones de mercado tampoco ayudaron al desarrollo de la geotermia. El precio de la electricidad en Chile pasó de ser de los más altos de Sudamérica a uno cada vez más bajo, lo que en un sistema de generación de electricidad como el chileno, basado en una oferta pública por licitaciones y con un fuerte control del precio de mercado, hicieron que la geotermia “no fuese competitiva” en esas licitaciones. Por el contrario, la generación de electricidad mediante paneles fotovoltaicos tuvo cada vez un costo más bajo, aumentando considerablemente el aporte de esta renovable a nuestra matriz energética y haciendo que los precios de las licitaciones eléctricas fuesen cada más bajos. Consecuentemente, la generación de electricidad mediante geotermia fue cada vez menos competitiva, por supuesto, siempre dentro de la “lógica de una economía de mercado”.

La entrada masiva de la generación de electricidad mediante paneles solares permitió a Chile dar un salto mayúsculo en la generación de electricidad mediante fuentes de energía renovables. Pero, paradójicamente, coartó en cierta medida el desarrollo de la geotermia, ya que los precios de generación de electricidad con este recurso no eran competitivos si se comparaban con los de la solar.

Poco a poco las numerosas empresas geotérmicas que había en el país

³ Ruggero Bertani, “Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report”, *Geothermics* 60 (2016): 31–43.

⁴ Alfredo Lahsen, “Origen y potencial de energía geotérmica en los Andes de Chile”, en *Geología y Recursos Minerales de Chile*, eds: José Frutos, Roberto Oyarzún y Marcos Pincheira: 423 – 438. (Concepción: Universidad de Concepción, 1986); Alfredo Lahsen, Fabián Sepúlveda, Juan Rojas y Carlos Palacios, “Present status of geothermal exploration in Chile”, *Proceeding World Geothermal Congress 2005*, Abtalya, Turkey (24–29 abril, 2005).

en los primeros años del siglo XXI fueron cerrando sus oficinas y empezó a respirarse un cierto aire pesimista cuando se escuchaba hablar de geotermia. Sin embargo, entre las empresas que se mantuvieron en Chile (algunas de ellas siguen sus actividades aquí) se generó una suerte de competencia por conocer cuál de los proyectos que estaban más avanzados vería la luz antes. Para entonces, el proyecto geotérmico desarrollado en las cercanías del volcán Tolhuaca,⁵ inicialmente explorado por la estadounidense Geo Global Energy (GGE) y después adquirido por la neozelandesa Mighty River Power (MRP), parecía ser el que tenía todas las opciones para ser el primero en generar electricidad mediante geotermia. De hecho, el pozo productor Tol-4 se presentó como uno de los más productivos del mundo, con una capacidad de generar hasta 14 MWe. Todo apuntaba a que MRP, con gran experiencia en el desarrollo de proyectos geotérmicos en Nueva Zelanda, sería la responsable de encender la primera ampollita geotérmica en el continente. Pero, por decisiones internas de la compañía, MRP decidió concentrar sus operaciones en Nueva Zelanda, cambiando de nombre a Mercury, y dejando una sensación de orfandad en el pueblo de Curacautín y sus comunidades aledañas, que veían en esta planta geotérmica una oportunidad de desarrollo local.⁶

Energía Andina, por otro lado, fue cerrando también sus operaciones. La empresa, constituida principalmente por capital de Antofagasta Minerals, tuvo una política de exploración muy ambiciosa, con numerosas áreas concesionadas a lo largo del país. Fue una empresa fundamentalmente chilena, con gran participación de geocientistas, pero –de nuevo– a pesar de contar en los últimos años con el socio australiano Origin, los precios de mercado desalentaron a los dueños y, poco a poco, se fueron desprendiendo de sus concesiones y cerrando sus oficinas.

Energía Andina tenía en su carpeta de proyectos, entre otros, el sistema geotermal Tinguiririca, en la cordillera de San Fernando, en una zona de difícil acceso, pero donde se realizó un sondaje exploratorio muy auspicioso.⁷ Tampoco prosperó.

Por último, otro de los proyectos candidatos a ser la primera planta geotérmica en Chile se estaba desarrollando en la cordillera a la latitud de Talca, el proyecto Mariposa, actualmente en propiedad de la empresa filipina Energy Development Corporation (EDC). Se anunció en varias ocasiones que comenzaban a perforar los pozos productores, en un cam-

⁵ Pablo Sánchez-Alfaro et al., “Physical, chemical and mineralogical evolution of the Tolhuaca geothermal system, southern Andes, Chile: Insights into the interplay between hydrothermal alteration and brittle deformation”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (2016): 324, 88-104.

⁶ Sofía Vargas Payera, “Understanding social acceptance of geothermal energy: Case study for Araucanía region, Chile”, *Geothermics* 72 (2018): 138-144.

⁷ Jorge Clavero et al., “Geological, geochemical, geophysical and first drilling data from Tinguiririca geothermal area, Central Chile”, *Geothermal Resources Council Transaction* 35: 731-734. Mercedes Vázquez, “Evolution of clay mineral assemblages in the Tinguiririca geothermal field, Andean Cordillera of central Chile: an XRD and HR-TEM-AEM study”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 282 (2014): 43-59.

po geotermal con mucha información geológica, geofísica y geoquímica desarrollada, incluso con pozos exploratorios perforados confirmando la existencia de un reservorio probado.⁸ Quizá este proyecto geotérmico sea el que presenta, hasta la fecha, una mejor ubicación geográfica, con proximidad a líneas de transmisión ya instaladas y en un área de acceso vial favorable. Sin embargo, nuevamente, las condiciones de mercado no permitieron que se desarrollase.

Este desaliento de las empresas desarrolladoras de geotermia instaladas en Chile hizo que ya por el año 2015 el Consejo Geotérmico fuese quedando reducido a cuatro compañías: EDC, Enel Green Power, Energía Andina (que fue paulatinamente desprendiéndose de sus concesiones) y Transmark; y solo unos pocos proyectos geotérmicos mostraban algún síntoma de poder desarrollarse en un futuro inmediato. De norte a sur, los proyectos que tenían mejores expectativas eran los de Cerro Pabellón (de Geotermia del Norte), Tinguiririca (Energía Andina), Mariposa (EDC) y Tolhuaca, que cambió de nombre a Peumayén al ser adquirido por la holandesa Transmark. Según datos del Consejo Geotérmico de Chile, las potencias que podrían generarse con esos cuatro proyectos superarían los 750 MWe (Tabla 1), habiendo invertido estas empresas en la última década más de US\$565 millones en los procesos de exploración y, en el caso de Cerro Pabellón, en explotación de los campos.

Tabla 1. Principales proyectos geotérmicos para generación de electricidad de Chile. Fuente: Consejo Geotérmico de Chile, 2018.

Proyecto	Cerro Pabellón	Tinguiririca	Mariposa	Peumayén/ Adobera
Empresa desarrolladora	GDN	Energía Andina	EDC/ Enerco	Transmark
Potencia P90	114 MW	200 MW	240 MW	220 MW
Ubicación	Ollagüe, II Región	Tinguiririca, VI Región	Laguna del Maule, VII Región	Volcán Tolhuaca, VIII y IX Regiones
Inversión realizada (MMUS\$)	385	40	40	100

Esta reducción en la actividad de exploración geotérmica en Chile se debió principalmente a limitantes de mercado, ya que las estimaciones realizadas por el Consejo Geotérmico de Chile, y publicadas en el 2018 en el documento conocido como Mesa de Geotermia, indican que el potencial de los recursos geotermiales conocidos ascendería a unos 3500 MWe, y con posibilidad real de instalar al menos unos 400 MWe en la próxima

⁸ Catherine Hickson et al. "The Mariposa Geothermal System, Chile", *Geothermal Resources Council Transactions* 35 (2011): 817-825.

década, siempre que las condiciones de mercado lo permitan. Sin lugar a dudas, Chile sigue siendo un gran proyecto geotermal, tan solo mínimamente aprovechado.

2. Cerro Pabellón: la primera planta de generación de electricidad con geotermia en Sudamérica

En la carrera por construir la primera planta geotérmica de Chile, finalmente fue el proyecto Cerro Pabellón quien llegó primero en esta travesía que se extendió durante años. En 2017 se terminó de construir la primera planta geotérmica de Sudamérica que, hasta 2016, era la única región del mundo que aún no generaba electricidad con este recurso, por lo que Cerro Pabellón (y Chile) supondrá un hito en el desarrollo de la geotermia en los países andinos, aportando energía limpia, independiente de las condiciones climáticas y amigable con el medio ambiente.

Tras varios años de exploración geológica, geofísica y geoquímica, el consorcio Geotérmica del Norte (GDN), conformado por la empresa italiana Enel Green Power y la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP), construyó la planta en el área de Cerro Pabellón, en el sector conocido como Pampa Apacheta (ver Figura 2), a unos 4500 m de altura. Es la planta geotérmica más alta del mundo y está ubicada a unos 75 km al noreste de la ciudad de Calama, en la Región de Antofagasta, en pleno desierto de Atacama.

Para llegar a este hito se dieron una serie de acontecimientos y descubrimientos geológicos que permitieron que, en un sector como Pampa Apacheta, donde no había evidencias de manifestaciones geotermales en superficie, tengamos hoy la primera planta de generación de electricidad mediante geotermia del continente.

La historia de cómo se descubrió este campo geotermal no está exenta de singularidades. Una de ellas es que Cerro Pabellón puede clasificarse como un “sistema geotermal ciego”, debido a que no hay manifestaciones geotermales en superficie (fumarolas, piscinas calientes, surgencias termales, etc.) que indicasen que en profundidad podría haber un recurso geotermal. Solo se conocían unas fumarolas en la cima del cerro Apacheta (un volcán extinto). Entonces, ¿cómo se descubrió el reservorio geotermal que hoy día alimenta a la planta geotérmica de Cerro Pabellón?

La historia comenzó curiosamente en 1993, cuando la Corporación Nacional del Cobre (CODELCO) decidió realizar una campaña de exploración de agua subterránea para abastecer sus proyectos mineros en lo que se conoce como Pampa Apacheta. Un pozo realizado a 187 m de profundidad comenzó a emanar vapor de agua a temperaturas del orden de 88 °C. Fue una sorpresa para CODELCO, y como se dice en el mundo de la geociencia: “¡Se había pinchado un reservorio geotermal!”.

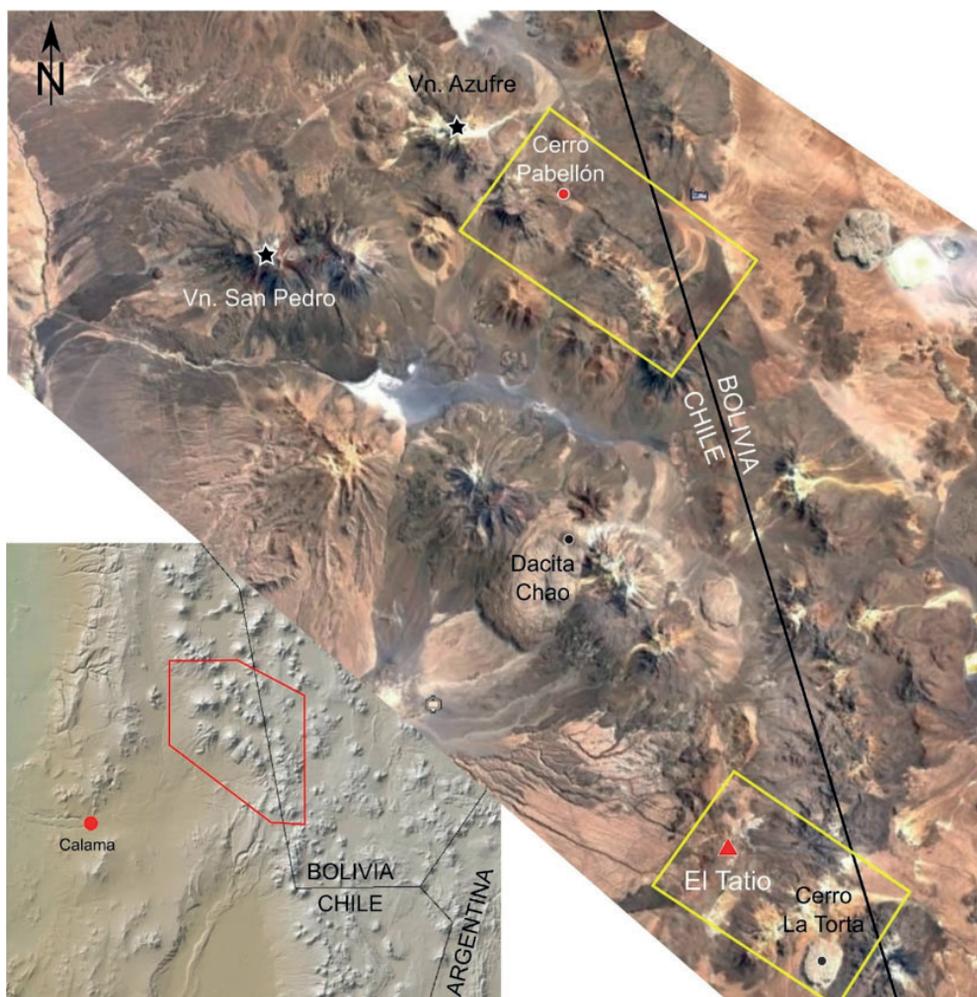


Figura 2. Ubicación de Cerro Pabellón. Imagen del norte de Chile, mostrando la ubicación del sector donde se ubica Cerro Pabellón y El Tatio. El inserto inferior corresponde a un modelo de elevación digital del norte de Chile en donde resaltan los relieves positivos de los centros volcánicos existentes en la zona. Fuente: Adaptado de Google Earth ©.

Con ese hallazgo sobre la mesa, fue a finales de la década de los 90 cuando profesionales de la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP) y la empresa estadounidense Unocal Corporation desarrollaron las primeras campañas de exploración geológica encaminadas a descifrar el origen de las aguas calientes que afloraban a partir de esa perforación en la pampa. En esas campañas se muestrearon y analizaron las fumarolas en la cima del cerro Apacheta, unos 4.5 km distantes de donde CODELCO realizó su pozo de agua PAE-1. Se continuó con la obtención de más datos geológicos, geoquímicos y geofísicos en la Pampa Apacheta, conformada por un graben geológico, fácilmente reconocible en fotos satelitales e imágenes Google Earth (Figura 3).

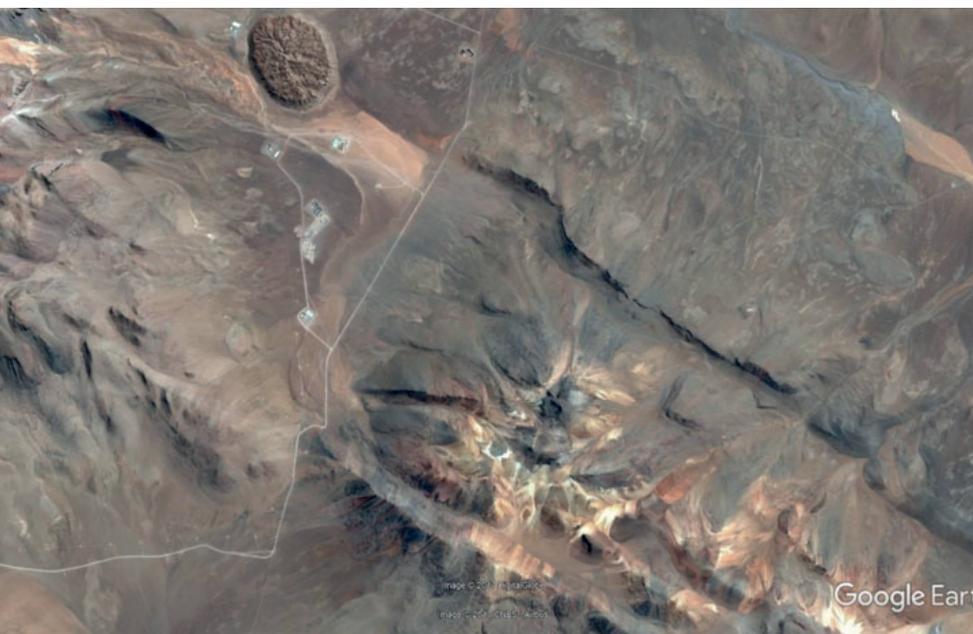


Figura 3. Imagen de la Pampa Apacheta con la ubicación de la planta geotérmica Cerro Pabellón y los pozos de reinyección. Los rasgos topográficos que destacan son los del Domo Cerro Pabellón y los escarpes de los sistemas de fallas NW-SE que controlan la permeabilidad secundaria en el reservorio del sistema geotermal Cerro Pabellón. Fuente: adaptado de (Imagen: Google Earth ©).

Sobre la base de los datos geológicos, geoquímicos y geofísicos recopilados, en la reunión del Geothermal Resources Council del año 2002, se presentó a la comunidad internacional el nuevo proyecto geotermal “Pampa Apacheta”,⁹ donde se infería la existencia de un reservorio geotermal en profundidad en la pampa con temperaturas entre 250 y 325 °C. Previamente, en diciembre del 2000, se había constituido el consorcio Geotérmica del Norte (GDN), conformado por ENAP (51%) y CODELCO (49%) con el objetivo de explorar los sistemas geotermiales del norte de Chile, incluyendo el proyecto Apacheta.

En el año 2002, GDN comienza a desarrollar los primeros estudios geológicos y geofísicos en la zona y en el 2005, ENEL Green Power comienza a participar del consorcio, comprando progresivamente la participación de CODELCO, hasta ser, junto a la ENAP, los únicos dueños, dividiéndose el 48.6% para ENAP y 51.4% para Enel Green Power. Hoy en día, la participación de ENAP en GDN es de solo 15.6%, siendo el 84.6% restante propiedad de Enel Green Power.¹⁰

⁹ Luis Urzúa et al., “Apacheta: a new geothermal prospect in northern Chile”. *Geothermal Resources Council Annual Meeting*, Reno NV (2002): 65-69.

¹⁰ Para un mejor desarrollo de la historia de Cerro Pabellón ver: Guido Cappetti et al., “The Cerro Pabellón Geothermal Project (Chile): from surface exploration to energy production”, *Proceedings World Geothermal Congress*, Reykjavic, Iceland (2020).

Una vez que Enel Green Power entra en escena en GDN, a partir del 2005, se desarrollaron nuevos estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos en el área y, en 2007, se perfora un pozo exploratorio de 520 m de profundidad que permitió refinar el modelo conceptual previamente elaborado en el trabajo de Urzúa et al (2002).¹¹ Los resultados de este pozo exploratorio fueron muy alentadores: se llegó a medir temperaturas por encima de los 200 °C en la base del mismo, lo que junto a los datos geofísicos levantados, el contexto geológico especialmente favorable (graben extensional con evidencias de actividad volcánica “reciente”) y unos precios de electricidad altos, permitieron el desarrollo de un modelo conceptual más refinado y que GDN apuntase al desarrollo de la explotación del campo geotermal. Fue así como entre 2009 y 2010 se perforan cuatro pozos productores profundos, de hasta 2000 m. Tres de estos pozos se perforaron en el interior del graben y el cuarto fuera del mismo para poder refinar el modelo conceptual que GDN estaba elaborando. Efectivamente, los tres pozos productores (CP-1, CP-2 y CP-3) confirmaron la existencia de un reservorio geotermal con temperaturas entre 250 y 260 °C.

También en 2009, GDN realiza trabajos de exploración en el sector de La Torta-El Tatio, donde el 9 de septiembre se produjo una descarga descontrolada al realizar una prueba de pozo en el sector. La situación generó un fuerte impacto mediático, con importantes movilizaciones solicitando el cierre de las actividades de exploración y explotación que se estaban desarrollando en la zona. Sin lugar a dudas, fue un “balde de agua fría” para el desarrollo de la geotermia en Chile y, en particular, en el norte del país. En la prensa local se habló de daño ambiental irreparable y tuvo una alta cobertura mediática. Este sector era el que tenía todas las papeletas para convertirse en el primer proyecto geotérmico en Chile, pero el rechazo de las comunidades atacameñas, sobretodo de organizaciones residentes en San Pedro de Atacama, fue tan grande —y el impacto mediático tan amplio— que, a pesar de que un estudio realizado por expertos internacionales descartó la existencia de algún tipo de impacto ambiental, el sector de El Tatio-La Torta quedó postergado como proyecto a ser desarrollado y las zonas de géiseres del Tatio fueron entregadas a las comunidades atacameñas de Toconce y Caspana para su administración por 50 años.¹²

Luego de este evento es que entró el “segundo proyecto en carpeta” que tenía Enel Green Power: Cerro Pabellón. Para realizarlo, la empresa trae a Chile a Guido Cappetti, un ingeniero con gran experiencia en el desarrollo de proyectos geotérmicos en Italia. Es posible que, en un comienzo, el pensar en desarrollar geotermia en Cerro Pabellón fuese todo

¹¹ Luis Urzúa et al., “Apacheta: a new geothermal prospect in northern Chile”. *Geothermal Resources Council Annual Meeting*, Reno NV (2002): 65-69.

¹² Más información en el informe “Revisión de la Ejecución del Proyecto Perforación Geotérmica Profunda El Tatio Fase I”, del Programa de Nacional Unidas para el Desarrollo, publicado en octubre de 2010.

un reto. Sumado a la altura (4500 msnm), estaba el hecho de no tener evidencias en superficie de un sistema geotermal en profundidad y, además, tener que trabajar con una minuciosidad y prolijidad máxima, ya que el fenómeno de El Tatio —el “desastre ambiental”, como fue señalado por la prensa nacional— estaba muy reciente en la memoria de las comunidades y de importantes sectores políticos del país. Pero la apuesta que hizo Enel Green Power y GDN fue valiente y se concretaron esos pozos profundos que confirmaban la existencia de un reservorio con capacidad para generación de electricidad sustentable.

Tras los exitosos resultados, se realizaron las correspondientes solicitudes de permisos ambientales y en julio de 2015 se pudo comenzar las actividades de construcción de la planta. Entre 2015 y 2017 se completó el programa de perforación de los pozos productores y de reinyección, y también la construcción de la planta. En marzo de 2017, con la presencia de la presidenta de la República, Michelle Bachelet, se inauguró formalmente la planta geotérmica más alta al mundo, la primera de Chile y Sudamérica, incorporando, por fin, al continente sudamericano la generación de electricidad mediante esta fuente de energía renovable, tan abundante en nuestra cordillera de los Andes.

Hoy día la planta Cerro Pabellón (Figura 4) está conformada por dos unidades de ciclo binario de 24 MWe cada una, lo que supone una capacidad total instalada de 48 MWe, un total de 13 pozos perforados durante las etapas de exploración y desarrollo de la planta, con seis pozos de producción y cuatro de reinyección. Solo uno de los pozos productores perforados no se usa en la operación de la planta, lo que significa que más del 90% de los pozos perforados han sido exitosos, rasgo destacable y poco común en el desarrollo de campos geotermales en otros países. Esos 48 MWe de electricidad que se generan en la planta Cerro Pabellón es la energía necesaria para cubrir la demanda anual de unas 165.000 casas, suponiendo una reducción en la emisión de CO₂ del orden de 166.000 toneladas/año. Son cifras que nos deben hacer reflexionar sobre la relevancia de la geotermia en Chile. Además, durante 2021 se comenzó a construir la tercera unidad, la que estará concluida en 2022 y aportará 33 MWe adicionales de energía limpia, renovable y autóctona a nuestra matriz energética.

En términos socioambientales, este proyecto no ha estado exento de tensión. Tal como se revisa en el capítulo VII sobre las variables culturales y sociales de la geotermia, la utilización del recurso geotérmico se desarrolla con un marco legal particular, siendo de hecho, la única energía renovable que cuenta con una ley específica, ya que se interviene el subsuelo de los territorios. La ley de geotermia (19.657), publicada en el año 2000, está enfocada en el aprovechamiento eléctrico y se basa en que el recurso es de propiedad del Estado, posibilitando a un particular explotarlo mediante



Figura 4. Planta de producción de electricidad con geotermia Cerro Pabellón. Fuente: Archivo CEGA.

una concesión. No obstante, algunos artículos de esta ley¹³ no conversan necesariamente con el Convenio N° 169 sobre Pueblos Indígenas y Tribales de la OIT, ratificado por el Estado chileno en septiembre de 2008, cuyo objetivo es superar las prácticas discriminatorias y hacer posible que los pueblos originarios participen en la adopción de decisiones que afectan a sus vidas.

Particularmente, en el marco del proyecto Cerro Pabellón, comunidades de Taira y Pueblo de San Pedro han presentado reclamaciones en los tribunales ambientales sobre el potencial impacto en el territorio asociado a los proyectos de ampliación de la planta y al cumplimiento o no de acuerdos entre las comunidades y la empresa, así como las dimensiones patrimoniales y de sitios arqueológicos. En este sentido, tal como se señala también en el capítulo VI, contar con una ley particular y con una planta geotérmica es un primer paso, sin embargo, para que la geotermia tenga una adecuada aceptación social se requiere un rol activo desde el Estado para que se pueda contar con las garantías sobre el cuidado del recurso y de una integración ambiental y socialmente amable de los proyectos en los territorios, asegurando participación en los beneficios e incorporación de las visiones de las comunidades.

¹³ Cristóbal Carmona Caldera, “The road less travelled: the duty to consult and the special rule of article 15.2 of ILO Convention 169 in the case of geothermal energy concessions in Chile”, *Journal of energy & natural resources law* 35 (2017): 485-501.

3. Cerro Pabellón: una experiencia exitosa de colaboración universidad-empresa

Desde los inicios del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), siempre se ha buscado una colaboración efectiva con las diferentes empresas geotérmicas existentes en el país. Este camino no ha sido "de rosas" y, si bien hubo algunas instancias positivas, no se puede decir que la colaboración entre el sector privado, que estaba desarrollando las campañas de exploración geotérmica en Chile, y la academia (en este caso el CEGA) fuese todo lo activa que se pudiese esperar.

No obstante, hubo instancias de colaboración destacables, como ocurrió con Energía Andina, que permitió al CEGA acceder al sondaje exploratorio de su proyecto Tinguiririca; con GeoGlobal Energy, que cedió un sondaje exploratorio del sistema geotermal Tolhuaca; y con Minera Collahuasi, que hizo lo propio con los sondajes que disponían del sistema geotermal Olca. Fueron oportunidades únicas para poder avanzar en el conocimiento de los sistemas geotermiales andinos. Gracias a esos sondajes, se realizaron tesis, memorias y publicaciones científicas en las más prestigiosas revistas internacionales de la especialidad y se pudo entender y analizar de forma directa el subsuelo de varios proyectos geotermiales. Estudios que, sin la existencia de los sondajes exploratorios compartidos por las empresas, hubiesen sido imposibles.

Dentro de las colaboraciones destacadas está el caso de Transmark. Con el objetivo de poner a disposición del desarrollo de la geotermia de Chile la experiencia adquirida con CEGA, se han generado espacios de sinergia con la empresa, con la que siempre ha existido una colaboración muy fluida y —aunque están enfrentado situaciones complejas, debido a resistencia social a sus proyectos en la Región de la Araucanía— la colaboración ha permitido (y continua permitiendo) seguir avanzando en el conocimiento científico de aquellos sistemas geotermiales en los que tienen concesiones.

Por otra parte, con la empresa Geotérmica del Norte se consiguió incluso firmar un acuerdo de cooperación científica. Este acuerdo se ha renovado recientemente y da cuenta del interés tanto de GDN como del CEGA de trabajar en conjunto con miras a un mejor conocimiento de los sistemas geotermiales chilenos. Este documento de cooperación, impulsado enormemente por Guido Cappetti y Gianni Volpi (GDN-Enel Green Power), ha permitido tener acceso a datos de Cerro Pabellón y a sondajes de otros sistemas geotermiales (Nevados de Chillán, Calabozos). Sin lugar a dudas, el acceso a esos sondajes, en donde se puede muestrear rocas del subsuelo, es de un valor científico único.

Los altos costos de la perforación están fuera del alcance del CEGA, por ello el aporte y sinergia que se puede generar con las empresas geotérmicas es fundamental. Son las empresas privadas, que desarrollaron y

siguen desarrollando la exploración geotérmica en Chile, las que han podido realizar estos sondeos de varios cientos de metros de profundidad. Sondas que permiten tener acceso a unidades de rocas profundas y que nos han permitido poder establecer modelos conceptuales robustos de varios de los sistemas geotermiales activos en nuestro país.

Esta cooperación entre el CEGA y GDN es, sin lugar a dudas, un inmejorable ejemplo de una relación virtuosa entre el sector privado y la academia. Gracias a esta cooperación, CEGA ha avanzado en conjunto con GDN, entre otras temáticas, en el conocimiento del sistema geotermal Cerro Pabellón. Se han realizado varias memorias de título y se han publicado varios artículos científicos amparados por este programa de cooperación científica.¹⁴ Además, el CEGA se ha transformado en el laboratorio de referencia para realizar los análisis de fluidos y gases que, de manera periódica, Cerro Pabellón debe reportar para sus monitoreos ambientales.

Esta colaboración, que se sigue manteniendo activa, muestra que es posible una convivencia armónica entre el desarrollo científico que persigue un centro de investigación como el CEGA y el afán por desarrollar un proyecto de generación de electricidad por parte del privado. Además, se ha podido trabajar en problemas reales asociados a la actividad cotidiana de la planta geotérmica. Una asociación virtuosa que debe servir de plataforma para una mayor y mejor cooperación entre el sector productivo y la academia, como una forma de ampliar la frontera del conocimiento y permitir desarrollar nuevos programas de investigación, desarrollo y, por qué no, innovación encaminados a un mayor y mejor desarrollo de la geotermia en Chile.

Esta cooperación CEGA-GDN nos ha permitido abordar, como centro de investigación, la comprensión de un sistema geotermal “de verdad”, no solo con meros fines académicos. Creemos que el ejemplo de esta relación academia-empresa debe replicarse por el bien del desarrollo de la geotermia en Chile. Una buena coordinación entre los actores públicos, los privados y la academia debe ser considerada necesaria, incluso imprescindible, para un desarrollo sustentable de esta energía renovable tan abundante que tenemos bajo nuestros pies, y que esperamos pueda presentar un mayor desarrollo en el Chile de los próximos años.

¹⁴ Santiago Maza et al., “Clay mineral associations in the clay cap from the Cerro Pabellón blind geothermal system, Andean Cordillera of Northern Chile”, *Clay Minerals* 53 (2018): 117-141; Nelson Román et al., “Geochemical and micro-textural fingerprints of boiling in pyrite”, *Geochimica et Cosmochimica Acta* (2019): 246, 60-85; Marco 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”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 384 (2019): 1-14; Martin Reich et al., “Silver-rich chalcopyrite from active Cerro Pabellón Geothermal System, Northern Chile”, *Minerals* 10 (2020): 113; Marco Taussi, “Soil CO2 flux and temperature from a new geothermal area in the Cordón de Inacaliri volcanic complex (Northern Chile)”, *Geothermics* 89 (2021); Santiago Maza et al., “Active and fossil hydrothermal zones of the Apacheta volcano: insights for the Cerro Pabellón hidden geothermal system (Northern Chile)”, *Geothermics* 96 (2021a); Santiago Maza et al., “The hydrothermal alteration of the Cordón de Inacaliri Volcanic Complex in the framework of the hidden geothermal systems within the Pabellonco graben (Northern Chile)”, *Minerals* 11 (2021b): 1279; Benigno Godoy et al., “Evolution of the Azufre volcano (northern Chile): implications for the Cerro Pabellón Geothermal Field as inferred from long-lasting eruptive activity”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 423 (2022): 107472.

Con esta experiencia, hoy el anhelo es poder generar espacios de colaboración de forma transdisciplinaria, esto quiere decir, sumar a la alianza academia-empresa la sociedad civil, comunidades indígenas y a instituciones públicas para hacer de la geotermia una energía usada ampliamente y que responda a los problemas urgentes de los territorios, como la pobreza energética y limpiar la matriz energética nacional.

4. Palabras de cierre

Después de más de un siglo desde aquellas primeras exploraciones realizadas por el ingeniero Ettore Tocchi, hoy Chile puede decir que la generación de electricidad mediante geotermia es posible. Serán 81 MWe de electricidad los que la planta Cerro Pabellón aportará a nuestro sistema eléctrico. Una cantidad notable, pero aún muy menor si consideramos el potencial que tras el estudio realizado por la Mesa de Geotermia en 2017 podría ser incorporado a nuestra matriz energética en las próximas décadas. Este estudio, el primer análisis serio sobre el posible efecto de la incursión en la matriz energética de Chile, indicaba que al 2030, con los proyectos de mayor avance en el país, se podrían incorporar casi 600 MWe y, al 2050, casi 1500 MWe adicionales podrían estar generando energía 24/7, aportando seguridad a nuestro suministro eléctrico. Estamos hablando, por lo tanto, de un potencial que podría estar en operación en Chile para el 2050 de casi 2100 MWe de energía autóctona, brindando seguridad e independencia energética. Términos que, mientras escribimos este capítulo, están golpeando fuertemente el mercado eléctrico internacional.

La invasión de Rusia a Ucrania de 2022 está generando, entre otras vicisitudes, una inseguridad energética en Europa sin parangón. Y nosotros, en Chile, no debemos ni podemos estar ajenos a este nuevo panorama energético internacional. La seguridad energética debe ser un tema de Estado, no del gobierno de turno. Es aplaudible la política energética que ha tomado Chile de apostar por las renovables. Pero, en un contexto local, marcado por una preocupante escasez hídrica, y una inseguridad de los mercados internacionales para suministro del gas natural licuado, mirar a ese recurso energético que tenemos bajo nuestros pies, que la naturaleza geológica del país en el que vivimos brinda, debiese ser prioritario. La experiencia exitosa de Cerro Pabellón no debiera quedarse en una anécdota, sino ser el primer paso hacia un desarrollo masivo de la geotermia en el país.

CAPÍTULO V

Comunicación de la geotermia

Sofía Otero Cavada y Luz Fariña Rivas

¿Qué se dice de la geotermia? ¿Cómo se la caracteriza cuando se habla de ella en medios de comunicación? ¿Cuál es la percepción de los periodistas sobre la energía geotérmica? Estas son algunas de las preguntas que este capítulo busca responder y, a la vez, hacer una revisión sobre el desafío de comunicar sobre la geotermia, tomando en consideración la evolución del trabajo realizado por la unidad de comunicaciones del CEGA.

1. ¿Cómo amar al patito feo de las renovables?

Desde el trabajo de comunicaciones del CEGA hemos visto como, a nivel general, la geotermia ha sido omitida en el discurso de las energías renovables en el país. Comunicar sobre la energía geotérmica es una tarea complicada, ya que, de partida, es una energía oculta bajo nuestros pies, un potencial que no está a la vista de la ciudadanía, como sí lo están, por ejemplo, la solar, la eólica o la mareomotriz. Esto implica preparar mensajes muy directos, en los cuales se debe trabajar de manera precisa la traducción de los mensajes abstractos a ideas concretas para poder llegar a públicos no expertos.

En segundo lugar, cuando hablamos de geotermia, tanto de alta o de baja entalpía, las imágenes, fotos o íconos que podemos usar para acompañar los mensajes comunicacionales no presentan una estética favorable para captar la atención y aceptación de los receptores de los mensajes. En el área de comunicaciones del CEGA muchas veces nos preguntaron si la imagen de Cerro Pabellón era “una planta termoeléctrica contaminante”, debido a su semejanza y al desconocimiento del humo que se ve desde su exterior. Por otra parte, para la energía de baja entalpía, las bombas de calor geotérmicas son dispositivos similares a refrigeradores, y ha sido necesario preparar una serie de infografías y material de divulgación científica para poder acompañar los mensajes y el trabajo que se ha realizado en el ámbito de la climatización con energía geotérmica.

Lejos de ser un inconveniente, esta situación le dio a CEGA la libertad de crear, experimentar y establecer el primer conjunto de productos y actividades independientes, con una perspectiva local, relacionada con la geotermia en Chile, enfocada a un público objetivo que incluye estudiantes (desde la educación básica hasta estudiantes universitarios), medios de comunicación, tomadores de decisiones, ciudadanos interesados y comunidades locales acerca de proyectos geotérmicos. Entre todas estas audiencias,

valoramos a los jóvenes como una audiencia central, porque están llevando a cabo un proceso formativo educativo y nuestro programa de divulgación genera contenido que puede complementar su aprendizaje formal sobre temas como la energía, el patrimonio natural y el cuidado del medio ambiente. Además, los jóvenes han sido nuestro público privilegiado, porque la gran mayoría de los miembros de nuestro centro son ciudadanos jóvenes, estudiantes de pregrado y postgrado, y confiamos en estos fuertes lazos para transmitir nuestro mensaje a un público más amplio a través de sus redes sociales,¹ siendo Facebook, Twitter, Youtube e Instagram nuestros principales canales de información, junto con una estrategia de gestión de medios.

Pero, ¿cuál ha sido la estrategia para apostar a una comunicación efectiva de los beneficios de esta energía? En primer lugar, se identificó la necesidad de responder a cuatro temáticas: qué es la geotermia; identificación de los mitos más comunes sobre la geotermia y su correcta explicación; cómo funciona una planta de energía geotérmica; y cuáles son los usos directos de la energía geotérmica. Esta base de información sirvió para preparar los primeros materiales de trabajo con los distintos públicos de interés del CEGA.

Para poder comunicar sobre la geotermia usamos a los volcanes como puerta de entrada para enganchar a los distintos públicos, en tanto responsables del enorme potencial de energía que tiene nuestro país. De esta manera, la belleza de los volcanes y la atracción que provocan en la audiencia, por sus características asociadas al riesgo, fueron una alianza de trabajo para poder motivar y despertar el interés por la energía geotérmica.

2. Geotermia en los medios de comunicación

Una búsqueda general en medios chilenos de comunicación masiva sobre geotermia, nos lleva a dos hechos noticiosos con amplia cobertura: el incidente de El Tatio (2009) y la inauguración de la primera planta geotérmica de América Latina: Cerro Pabellón (2017). Sin duda, dos hechos muy opuestos desde el carácter noticioso.

2.1. Una mala noticia: El Tatio

La geotermia estuvo en los titulares nacionales producto de una mala noticia en julio de 2009. Una descarga de vapor no controlada de 60 metros se activó accidentalmente durante 27 días en el campo de géiseres de El Tatio, Región de Antofagasta. Esto fue detonado por trabajadores de la empresa Geotérmica del Norte que realizaban pruebas en un antiguo pozo de exploración en desuso.

¹ Paul Adams, *Grouped: How small groups of friends are the key to influence on the social web* (Berkeley: New Riders, 2011).

El campo de géiseres de El Tatio es el más grande de América Latina y un importante punto turístico para el norte del país. Un año antes del accidente, la concesión geotérmica había sido aprobada pese a la oposición de las comunidades locales e indígenas de la zona. Dichas organizaciones formaron posteriormente al incidente la agrupación “Salvemos al Tatio”. La institucionalidad ambiental de la época finalmente ordenó la suspensión de las faenas de exploración, las que nunca fueron retomadas.

Un análisis de prensa escrita² revisó la cobertura entre el 18 de septiembre y 18 de octubre de 2009 en dos diarios chilenos de alcance nacional, La Tercera y El Mercurio. El accidente tuvo una amplia cobertura en la sección nacional, con un total de 17 portadas.

De acuerdo con el estudio, el tratamiento periodístico estuvo marcado por un bajo nivel de análisis sobre las causas del incidente. En variadas ocasiones se mencionó el impacto ecológico y ambiental. Sin embargo, las fuentes informativas en su mayoría no eran especialistas. El 95% describió a la energía geotérmica como una tecnología que implica múltiples riesgos y solo un 5% incluyó los beneficios de este tipo de fuente energética.

Por otra parte, Carlos Jorquera, editor para América Latina del portal internacional Piensa en Geotermia —entrevistado en el marco de la escritura de este capítulo—, comentó que el medio informó en sus plataformas el 2009 sobre la situación que estaba ocurriendo en Chile, y luego dio a conocer los resultados arrojados por el equipo de profesionales internacionales que hizo un estudio ambiental detallado acerca de los impactos (expertos extranjeros que fueron contratados por el Ministerio de Energía). Para Jorquera, estos resultados no fueron visibilizados por la prensa nacional, sino solo el inicio del conflicto.³

Antes de este incidente, la energía geotérmica sí que era desconocida para la ciudadanía. Al año siguiente de este evento se crearía el CEGA, y con esos antecedentes, el plan de comunicación y divulgación del centro se puso como objetivo dar a conocer la energía geotérmica a diferentes audiencias, porque ninguna otra institución pública en el país, que se suponía que debía promoverlo, estaba invirtiendo en esta tarea.⁴

2.2. Una buena noticia: Cerro Pabellón

“(Cerro Pabellón) es una demostración empírica de cómo estamos uniendo las fuerzas del mundo público y privado, de cómo estamos asumiendo riesgos codo a codo”, afirmaba la entonces presidenta de la república Michelle Bachelet, quien encabezó la inauguración de Cerro Pabellón, acompañada de los

² Sofía Vargas, “Energía geotérmica en los medios chilenos: la oveja negra de las renovables”. En *IAMCR Cartagena, Colombia* (16-20 de julio, 2017).

³ Entrevista realizada a Carlos Jorquera, editor para América Latina de Piensa en Geotermia. Realizada por Luz Fariña, comunicaciones CEGA (2020).

⁴ Sofía Otero, “Fighting the information gap and the steam monster, the Chilean experience on geothermal outreach”. *Proceedings World Geothermal Congress* (2018).

ministros de Energía y Medio Ambiente. Junto a ellos participaron una delegación de altos ejecutivos de las dos empresas involucradas en el proyecto, autoridades locales y todos los actores nacionales involucrados en temas de energía y geotermia en Chile.

La primera planta de Sudamérica es ejecutada por Geotérmica del Norte —empresa conjunta controlada por Enel Green Power Chile (con 83,65%) y Enap (16,35%)—, que estuvo a cargo de esta iniciativa, ejecutando entre 2008 y 2013 la exploración en nueve concesiones geotérmicas, encontrando recursos en al menos cuatro de ellas.

Para que este proyecto se pudiera realizar se debió promulgar la ley de geotermia (año 2000) que creó el marco regulatorio requerido para el desarrollo de proyectos de este tipo.

La cobertura mediática fue completa a nivel nacional y abrió paso a nuevos espacios para poder gestionar más notas en medios de comunicación nacional sobre otras áreas de la energía geotérmica. Fue un momento de gloria y fama de esta energía y una oportunidad para poder gestionar columnas y llegar a nichos comunicacionales que no había sido posible antes de esta puesta en marcha.

2.3. (Des)conocimiento en los periodistas

“¿Para explotar la geotermia se necesita colocar un domo sobre un volcán?” Esta pregunta, aunque pintoresca, es clave para determinar los principios que guiaron la estrategia de divulgación y comunicaciones del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes al iniciar sus operaciones en 2011.

Con el objetivo de conocer qué sabían las y los periodistas de medios de comunicación sobre la energía geotérmica en esa época en Chile, se envió una consulta a la base de datos de prensa de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile —institución que aloja al CEGA— titulada “¿Qué es lo que usted siempre quiso saber de geotermia y nunca se atrevió a preguntar?”, la iniciativa era una invitación en forma de pregunta abierta para realizar consultas sobre esta energía, de forma bastante informal, que nos permitiera recoger dudas de los profesionales encargados de cubrir energías renovables sobre esta aún desconocida energía en Chile en aquella época.

De paso, era una forma de contar que el CEGA existía, y que estábamos disponibles para ser fuentes de información en los medios en temas vinculados a energías renovables, en aquella época aún con el segundo apellido de “no convencionales” siendo la geotermia quizás la menos convencional de todas: ni habitual ni con acuerdos que apoyasen su desarrollo.

La pregunta sobre el domo encima del volcán fue una de las que llegó, junto a otras del tipo: ¿Cuáles son los elementos tóxicos que disipan las

torres de las plantas geotérmicas?, ¿Es peligroso desarrollar la geotermia en un país sísmico como Chile?, e incluso ¿Geo qué?.

En el análisis de Vargas⁵ también se aplicó un cuestionario a periodistas y editores de medios de comunicación para conocer su comprensión sobre este tipo de energía. Al ser consultados sobre si la energía geotérmica tiene el mismo espacio en la pauta periodística que los otros tipos de energías renovables, como solar y eólica, la mayoría consideró que no, y las razones se relacionaban con la cantidad de proyectos en ejecución de las otras fuentes y el nivel de desarrollo de la tecnología en el país, entre otras. Al ser consultados sobre qué tipo de energía renovable no convencional consideraban que tenía mayor cobertura mediática, la respuesta mayoritaria fue la energía solar, representando el 90% de las respuestas.

Otro punto que se mencionó en las respuestas de los periodistas fue la falta de reporteros especializados en temas de energía y ciencia. Al respecto, en Chile hacia principio de los 2000, la formación profesional de la carrera de periodismo no contaba con la especialización de periodismo científico —asunto que aún hoy es incipiente— por lo que generalmente un periodista se especializa en ejercicio,⁶ y si la geotermia en ese entonces no aparecía en los medios locales, y los periodistas no sabían qué era la geotermia o cuáles eran sus características y beneficios, ¿cómo podríamos divulgar investigaciones más específicas sobre la geotermia hacia el público? ¿Era pertinente?

Por lo general, el mandato comunicacional para los centros de investigación financiados por organismos estatales es dar a conocer los resultados de las investigaciones que se generan al interior de los grupos generadores de conocimiento, lo cual generalmente supone que la ciudadanía tiene un conocimiento base sobre la geotermia. Acá es donde volvemos al domo sobre el volcán (que por si se lo preguntaban, pues no, no se requiere instalar un domo sobre un cráter para aprovechar la geotermia. Seguro lo sabían, pero en la Unidad de Comunicaciones del CEGA tratamos de no dar nada por sentado, pues esa puede ser una de las mayores trampas de la divulgación).

2.4. Contenidos sobre geotermia: el cambio de discurso hacia la conexión humana

Durante mucho tiempo, hablar de geotermia era hablar de producción de electricidad. No fue sino pocos años atrás que se empezó a enfatizar las bondades del uso directo y la vinculación de la geotermia con la calidad de

⁵ Sofía Vargas, "Energía geotérmica en los medios chilenos: la oveja negra de las renovables". En *IAMCR Cartagena, Colombia* (16-20 de julio, 2017).

⁶ Teresa Vernal et al., "Percepción de la formación y la especialización del periodismo científico en Chile", *Cuadernos. info*, 45 (2019): 213-226.

vida a escala humana. Hoy este giro, adoptado en el CEGA desde el 2015, es oficialmente el discurso internacional también.

De acuerdo a Carlos Jorquera,⁷ en Chile las noticias publicadas en los medios de energía y las que publica el Ministerio de Energía (y anteriormente el Ministerio de Minería), han estado principalmente relacionadas a la generación de electricidad. Durante el año 2020 y lo que va del 2021, se ha visibilizado más la geotermia asociada a usos directos, a pesar de que usos directos de la geotermia tenemos desde hace muchos años

El editor de Piensa en Geotermia y ThinkGeoEnergy, Carlos Jorquera, comentó que los contenidos desde su inicio estuvieron enfocados en la generación de electricidad, ya que al ser un *newsletter* geotérmico de alcance global, reporta lo que se va comunicando en todos los países. Esta situación cambió desde el Acuerdo de París, donde Europa tomó un rumbo hacia la transformación y utilización de fuentes renovables en los sistemas de calefacción distrital, ampliándose estos al concepto de energía distrital (frío y calor). Es este concepto de cogeneración (electricidad + calor) o calefacción pura el que hoy es foco en Europa. “Hemos publicado desde entonces muchas noticias relacionadas a nuevos sistemas de uso directo en Holanda, Turquía, Islandia, España, entre otros, además de plantas de cogeneración a lo largo de toda Europa (Alemania, Francia, España, Turquía, UK, Holanda, Hungría, Polonia, Suecia, etc.) y desde el año pasado hemos visto y reportado actividad de usos directos en Chile, México (acá hay una marca de comida geotérmica), y el desarrollo de GIZ en América Central (dar valor agregado a la agricultura)”.⁸

El giro hacia la vinculación geotermia-calidad de vida del CEGA se llevó a seminarios temáticos, donde se tocaron los usos directos de esta energía y de aplicaciones, como bombas de calor. Asimismo, en la estrategia de prensa del CEGA, se privilegió la visibilización de los proyectos de calefacción que se están desarrollando en el sur del país en medios locales. A diferencia de los años anteriores, las apariciones de prensa cambiaron de foco (de lo nacional a los medios locales) y aumentaron en más del triple desde el 2017 a la fecha.

3. Divulgación de la #EnergíaMásHot

La Unidad de Comunicaciones ha creado contenido con el objetivo de entretener, interesar y generar comprensión⁹ sobre la energía geotérmica en diferentes plataformas, privilegiando una estrategia de distribución “de

⁷ Entrevista realizada a Carlos Jorquera, editor para América Latina de Piensa en Geotermia. Realizada por Luz Fariña Rivas, comunicaciones CEGA (2020).

⁸ Entrevista realizada a Carlos Jorquera, editor para América Latina de Piensa en Geotermia. Realizada por Luz Fariña Rivas, comunicaciones CEGA (2020).

⁹ Terry Burns et al., “Science communication: a contemporary definition”, *Public Understanding of Science* (2003): 183-202.

contrabando”: cuando no se le espera y donde no se le espera;¹⁰ encontrándose con la audiencia por sorpresa en espacios públicos.

Si bien la tarea de comunicaciones y divulgación del CEGA es de dedicación diaria, y sobrepasa los proyectos icónicos que acá presentamos, dirigidos principalmente a la juventud, éstos son representativos del espíritu de la estrategia de divulgación para acercar la geotermia a los contextos cotidianos de una manera atractiva. Dado que todos estos productos se desarrollan bajo una Licencia Creative Commons, esperamos que puedan seguir difundiendo y utilizándose por nuevas generaciones en su propia labor de divulgación.

3.1. Libro “La Tierra del Fuego”

Durante los primeros días del CEGA, el centro recibió una copia del libro *Stories from the heated Earth*,¹¹ amablemente donado por Susan F. Hodgson, una de las editoras. La publicación reúne varias narraciones recogidas alrededor del mundo sobre la relación de pueblos originarios y antiguas naciones con la geotermia. El libro es un trabajo maravilloso y de gran inspiración, pero la ausencia de relatos de Chile en ese compilado rápidamente llevó a la Unidad de Comunicaciones a sentirse en deuda con el texto y con nuestro propio patrimonio geotérmico, ya que la única referencia a Chile allí era una alusión a Rapa Nui (también conocida como Isla de Pascua en la mayor parte del mundo occidental) y al uso de rocas volcánicas para la escultura de moais.

Así, nos sentimos autoconvocados a reunir más información sobre el patrimonio geotérmico local porque, como señalan los editores de *Stories from the heated Earth*, existe una idea generalizada y engañosa de que el calor de la Tierra es una nueva forma de energía, una innovación de la cultura moderna, más que un elemento que tíbicamente abraza y acompaña a las primeras naciones y culturas desde sus orígenes. Esas historias necesitaban ser contadas en el contexto actual, para ser contadas nuevamente, a una próxima generación.

Entonces surgió la idea de escribir el libro *La Tierra de Fuego*,¹² una obra dirigida a público juvenil y adultos interesados, donde lo visual tenía una gran preponderancia. De esta forma, la decisión editorial fue dar el mismo espacio para fotografías e ilustraciones que para palabras en cada página. Para completar la tarea, CEGA reunió a un equipo de 18 autores —geólogos(os), antropólogos(os) y periodistas— y más de 20 destacados

¹⁰ Corona, Adrián, “Meter la ciencia de contrabando, tarea del divulgador: entrevista a Diego Golombek”, *Revista Digital Universitaria UNAM* (México, 2010).

¹¹ Raffaele Cataldi, Susan Hodgson y John W. Lund, *Stories from a Heated Earth, Our Geothermal Heritage*. (Sacramento, California: Geothermal Resources Council, 1999).

¹² Sofía Otero, *La Tierra de Fuego: gente y naturaleza marcadas por el calor profundo* (Santiago, Proyecto Explora Conicyt, 2014).

artistas y fotógrafos nacionales para contar la historia de 15 zonas geotérmicas (volcanes, aguas termales, géiseres y más) del territorio que hoy habitamos en Chile. Las historias se contaron desde la perspectiva de las Ciencias de la Tierra, mostrando cómo la naturaleza se fracturó, hirvió y se movió para convertirse en los paisajes que conocemos ahora, y también desde el punto de vista de las Ciencias Sociales, narrando cómo las personas se han relacionado con estos sitios de manera espiritual, económica o festiva a lo largo de la historia.



Figura 1. Portada del libro *La Tierra de Fuego*, Archivo CEGA.

El proyecto se llevó a cabo gracias a un concurso público (Proyecto Explora CONICYT de Valoración y Divulgación de la Ciencia y la Tecnología) que permitió escribir, diseñar e imprimir 1.000 copias del libro, las cuales fueron donadas a las bibliotecas escolares, los Centros de Recursos para el Aprendizaje (CRA) de todo el país, Bibliómetros y la Biblioteca Libre, una pequeña biblioteca nómada que cabe en una camioneta y recorre parques, centros comerciales, escuelas y festivales para promover intercambios de libros entre gente joven. Una versión digital del libro también está disponible en https://issuu.com/cega_uchile/docs/latierradefuego

3.2. Mural temporal “Volcanes de Chile”

El arte mural es una herramienta poderosa para popularizar contenido en las comunidades locales: aporta información a los contextos cotidianos, embellece la calle, cuenta historias y su creación implica la síntesis de conceptos para facilitar su comprensión.

"Volcanes de Chile" fue el primer mural de inspiración científica y educativa en Chile. Fue un mural temporal, porque las paredes sobre las que estaba pintado cubrían el sitio de construcción de la estación de Metro Chile España, en la comuna de Ñuñoa, en Santiago, y su exposición duró más de un año. El CEGA lideró este proyecto con el apoyo de Metro de Santiago. Fue una obra de arte de 300 m², producto de varias sesiones de conversación entre tres muralistas integrantes de la Brigada Negotrópica (quienes también participaron en las ilustraciones del libro *La Tierra de Fuego* y su portada), una geóloga, un geólogo y una divulgadora. El objetivo de la pieza era provocar el interés de los peatones en lo que se encuentra debajo de nuestra furia montañosa, y llamar la atención sobre nuestra geología diversa, en un lenguaje pictórico que fuese llamativo.



Figura 2 y 3. Mural temporal “Volcanes de Chile”, Archivo CEGA.

Durante las primeras semanas del proyecto, los científicos involucrados querían incluir la mayor cantidad de información posible en el mural, la divulgadora quería mantenerlo simple, y los artistas aún intentaban entender qué significaba “subducción” y si “piroclástico” podría representarse en colores flúor o no. El trabajo final, que fue una mezcla de infografías gigantes y recreaciones hiperrealistas, fue el resultado de un proceso de negociación donde la curiosidad y el respeto mutuos sobre cada experiencia experta, fueron la clave de este experimento de arte callejero de ciencia pop a gran escala.

El mural fue promovido entre los profesores de ciencias de las escuelas vecinas, enviándoles una postal del mural, invitándolos a dar un paseo con sus estudiantes. El contenido representado incluía capas de la Tierra,

proceso de subducción, tipos de volcanes y erupciones históricas en Chile, cómo se forman los géiseres, las relaciones ceremoniales de los pueblos prehispánicos con los volcanes y la energía geotermal. Casi 6.900 peatones caminaban cerca de la esquina del mural todos los días, y la iniciativa tuvo una buena recepción en los medios, con casi 20 artículos publicados en periódicos y sitios web, junto con menciones en programas de radio y televisión. Después de que el mural fue desarmado, y gracias a que durante todo el tiempo en exhibición no fue rayado, las paredes fueron donadas a una institución que las usó para construir talleres para escolares en el área de la divulgación científica.

Esta experiencia piloto, de mezclar muralismo con contenido científico explícito, funcionó como una inspiración para otras experiencias posteriores en el ámbito de la divulgación de la geología en Chile. El 2018, la misma brigada muralista a cargo de “Volcanes de Chile” en Ñuñoa, fue convocada por el SERNAGEOMIN para pintar un mural de volcanes en San Fabián de Alico (Región de Ñuble) durante el transcurso de su Feria de Divulgación Volcánica; y unos meses después, los mismos artistas fueron llamados para pintar un muro interno de la Universidad de Concepción durante la ejecución del XV Congreso Geológico. Se sumó a esta lista de seguidores, el Museo de Ciencia y Tecnología de la Quinta Normal, que también solicitó una pequeña pintura de las capas de la Tierra para reemplazar antiguos afiches sobre estos conceptos en su Sala de Geología. Y al interior del CEGA la onda muralista tuvo también un subproducto: un mural codiseñado por escolares, profesores, una artista y la investigadora del área social del CEGA, Sofía Vargas, quien lideró esta iniciativa en 2019, como parte de una serie de acciones para generar apropiación tecnológica de un proyecto que calefaccionó con geotermia varias salas del Liceo Altos del Mackay, en Coyhaique. En ese contexto, se pintaron las paredes de la sala de máquinas del sistema con bomba de calor geotérmica, con un diseño que se trabajó en talleres semanales.

3.3. Conversando sobre la geología en pantalla

Las charlas son la actividad de divulgación más popular entre la comunidad científica chilena,¹³ pero no basta con ser un medio de comunicación muy utilizado, lo importante es cómo y qué se dice en esas exposiciones, y desde el CEGA ideamos una forma de hablar de geotermia desde el cine y la televisión.

Hay muchas películas cuyo tema central está relacionado con la geología, que trata sobre terremotos, tsunamis, volcanes y más. Además, hay muchas producciones audiovisuales con paisajes deslumbrantes, que son una delicia para los espectadores amantes de la naturaleza. Las películas

¹³ Sofía Otero & Luz Fariña. “Science Communication, the Chilean way”. 14th Public Communication of Science and Technology, Estambul, Turquía, 26-28 de abril, 2016).

también son mejores que las conferencias o los textos para involucrar a los jóvenes¹⁴ con las temáticas de las Ciencias de la Tierra. Al mismo tiempo, los productos convencionales, como las películas, pueden tener conceptos erróneos sobre la ciencia involucrada, ya sea a propósito, en beneficio de la narrativa del guion ficticio o porque las personas en su edad adulta todavía tienen conceptos erróneos sólidos sobre la geología.¹⁵ Por lo tanto, hablar sobre la geología en las películas y programas de televisión convencionales parecía una idea atractiva para las charlas en ferias y festivales de ciencias donde CEGA cada año era invitado a participar, como la Fiesta Nacional Explora de Ciencia y Tecnología (que reúne anualmente a unas 50 mil personas) o el Festival de Ingeniería y Ciencias de la Universidad de Chile (con 15.000 personas en sus versiones bianuales).

Así nació la idea de la charla “La geología de *Game of Thrones*” y “Maldita ficción: Geología en el cine”. En la primera, las expositoras (estudiantes de postgrado del CEGA) explican cómo se formaron algunos de los paisajes utilizados como escenarios en la famosa serie de televisión de HBO *Game of Thrones*, informando la historia geológica real de los lugares, con énfasis en las características geotermiales y volcánicas, como una cueva de aguas termales y la formación del “vidriagón” o *dragon glass*, como se llama en el programa de televisión, que es roca de obsidiana. Las expositoras señalan, además, en qué sectores andinos de Chile se pueden encontrar lugares y rocas similares a los que se muestran en la serie, todo lo cual es un gancho para terminar hablando del calor bajo nuestros pies, que hace posible muchos de estos hermosos paisajes y características. “La geología de GOT” atrajo tanta atención, que obtuvo cobertura mediática en un periódico de circulación nacional con un reportaje a doble página; y tras su estreno en 2017 se programó la charla en distintas universidades y ferias científicas.

Para la charla “Maldita ficción: Geología en el cine”, los ponentes revisaron diferentes películas relacionadas con las Ciencias de la Tierra, como *The Core* (2012), *The Wave* (2015), *Dante's Peak* (1997), entre otras, que en su mayoría trataban sobre un lado violento de la naturaleza. La presentación enfatizaba que mostrar eventos geológicos dramáticos favorecía la narración cinematográfica, sin embargo, también hay un lado positivo de los peligros geológicos: Chile convive con terremotos y erupciones volcánicas por su posición en un límite de placa, y esto también trae efectos positivos: la riqueza mineral y un enorme potencial geotérmico. Durante su estreno, la charla fue vista a tablero vuelto (100 personas) y visualizada por 3.800 personas en línea, convirtiéndose en la segunda charla más vista del festival.

¹⁴ Karen McNeal, et al., “Measuring student engagement, knowledge, and perceptions of climate change in an introductory environmental geology course”, *Journal of Geoscience Education* (2014): 655-667.

¹⁵ Mark Francek, “A compilation and review of over 500 geoscience misconceptions”, *International Journal of Science Education* (2013): 31-64.

3.4. Una aventura imposible: Viaje al centro del volcán

Considerando la creciente capacidad de atracción que generan los *location-based entertainment*¹⁶ — un concepto anglosajón, difícil de traducir, pero podría decirse que son zonas de entretenimiento temáticas, que reúnen gente para vivir una experiencia conjunta, como lo son los parques de diversiones, por ejemplo —, el proyecto de divulgación CEGA “Viaje al centro del volcán” exploró esta plataforma para la promoción geotérmica, creando una exposición interactiva gratuita que utilizaba escenografías, realidad virtual y aumentada, y un equipo de entusiastas mediadoras/es, jóvenes geólogas y geólogos que se capacitaron en actuación, educación y divulgación para guiar a las casi 3 mil personas que asistieron a esta exposición durante sus dos semanas de estreno.

“Viaje al centro del volcán” se montó por primera vez en 2019 en la estación de Metro Quinta Normal, y tras su estreno, la exposición fue donada a SERNAGEOMIN para utilizarse en sus ferias de divulgación volcánicas, las cuales se realizan dos veces al año en zonas expuestas a peligros volcánicos.

El objetivo de la exposición fue promover el aprendizaje sobre conceptos geológicos básicos de volcanes, junto a sus peligros y beneficios para la población, destacando que la naturaleza volcánica chilena genera un gran potencial geotérmico. La energía geotérmica se encuentra escondida bajo tierra y su invisibilidad es una de las características que dificulta la promoción geotérmica,¹⁷ por lo que uno de los objetivos de la experiencia de realidad virtual fue desentrañar el calor oculto de la Tierra a través de un fantástico viaje al corazón de una cámara magmática, e invitar a la audiencia a preguntarse cuánta energía pensaban que podría generarse con más de dos mil volcanes en Chile.

El arte de “Viaje al centro del volcán” se inspiró en el trabajo del novelista pionero de la ciencia ficción Julio Verne, e incluyó una nave de tamaño real para una tripulación de 4 personas que podían viajar dentro de un volcán a través de cascos de realidad virtual, ingresando por el cráter, llegando a la cámara magmática y escapando por un túnel volcánico lateral. La exposición cuenta además con un corredor de 12 paneles informativos, con imágenes de realidad aumentada, modelos animados y visores estereoscópicos, junto a la compañía de un equipo de jóvenes profesionales de la geología que recorrieron la exposición compartiendo sus experiencias sobre investigaciones volcánicas y geotermiales. Y si bien la exposición estaba dirigida a adolescentes, estos fueron un público minoritario (14% de las visitas), ya que el evento fue particularmente exitoso

¹⁶ Cristina Mihale-Wilson et al., “The Impact of Location-Based Games on Traditional Entertainment Products”, *SSRN Electronic Journal* (2018).

¹⁷ Matthias Gross, “Old Science Fiction, New Inspiration: Communicating Unknowns in the Utilization of Geothermal Energy”, *Science Communication* 35 (2013):810-819.

entre adultos, quienes constituyeron un 59% de las visitas, seguido de niñas y niños (27%).



Figuras 4 y 5. Imágenes de “Viaje al Centro del Volcán”. Archivo CEGA.

Para evaluar la efectividad de la exposición para promover conocimiento sobre la anatomía, peligros y beneficios de los volcanes en Chile, utilizamos un enfoque cuantitativo, aplicando una encuesta de 14 preguntas a una muestra de visitantes jóvenes (12–17 años) a través de mediciones sucesivas con un muestreo probabilístico; y también un enfoque cualitativo a través de un *focus group* con las y los mediadores de la muestra. Los resultados arrojaron que nuestro grupo objetivo ya tenía una buena base de conocimientos sobre los beneficios que pueden traer los volcanes, y la visita a la exposición elevaba este conocimiento, pero son los adultos quienes demuestran una preocupación por el bajo uso de la geotermia en Chile. En términos de aprendizajes sobre cómo vincular a la audiencia de forma activa en la experiencia, las y los mediadores señalaron que permitirle a los visitantes compartir sus propias experiencias con los distintos temas de la exposición y generar conversaciones era uno de los factores más efectivos, y lo evaluaron más positivamente que el acceso a las tecnologías de la exposición, que si bien generaban sorpresa y emoción, no eran tan efectivos para abrir el diálogo.

Un resumen de los contenidos de la exposición se llevó también a una pequeña publicación en formato libro acordeón, que cuenta con enlaces a *podcasts* donde pueden escucharse conversaciones de geólogos(as) y periodistas sobre los principales temas de la exposición. Casi todos los materiales están también disponibles para descarga en la web a través de la página del proyecto www.viajealcentrodelvolcan.cl

“Viaje al centro del volcán” se desarrolló gracias al financiamiento de un Proyecto Explora CONICYT de Valoración y Divulgación de la Ciencia y la Tecnología, el apoyo económico de CEGA y la colaboración de Metro de Santiago. En el año 2020 este proyecto fue seleccionado entre los finalistas del premio *Falling Walls Breakthrough of the Year* en la categoría *Science Engagement Initiatives*, que premia a proyectos que usan métodos creativos para conectar contenidos científicos con audiencias no expertas y visibilizar iniciativas ejemplares de todo el mundo con un enfoque transferible y/o escalable.

4. Proyecciones desde el enfoque de comunicaciones

La estrategia de comunicaciones del CEGA ha ido más allá de los resultados de los *papers* de excelencia publicados por los investigadores del Centro. El trabajo desarrolló productos innovadores en el área de la comunicación de la ciencia y además se vinculó con los tomadores de decisiones y las comunidades de manera directa en los territorios en que trabajó.

El CEGA es una fuente de información para los medios en la energía geotérmica. Pero, ¿cómo podría proyectarse la comunicación de la geotermia? Claramente, y en el contexto nacional e internacional de cambio climático, el foco debe ser a una escala aún más pequeña que los proyectos de uso directo, apelando directamente a cada uno de los ciudadanos y ciudadanas en su rol de demandar energía limpia y local a sus autoridades.

El rol de cada persona frente a la crisis climática y frente a la contaminación, principalmente en el sur del país, hacen que la proyección en el área de comunicaciones que aborda la geotermia debe apuntar a la responsabilidad de que Chile tiene y necesita con urgencia geotermia para sus hospitales, para sus barrios y para las nuevas construcciones que se desarrollen en el país, tanto a nivel público como privado.

Apéndice Capítulo V

Testigos geotérmicos

Philippe Robidoux

A fines de 2020 y durante 2021, en colaboración con Diego Aravena y Sofía Otero, realizamos entrevistas a algunos profesionales activos durante la última década y conocedores de la situación de la geotermia en Chile. Si bien la lista original era extensa, se logró entrevistar a tres testigos del desarrollo de esta energía en Chile. Sus miradas y visiones se presentan en esta sección por su valor testimonial y como una manera de incluir más voces sobre el tema en este libro. Sus enfoques complementan la perspectiva de comunicación de la geotermia.

Se entrevistó vía telemática a **Marit Brommer**, directora ejecutiva de la International Geothermal Association (IGA); **Jeff Witter**, geocientífico principal de la empresa canadiense Innovate Geothermal Ltd., quien realizó su trabajo de doctorado (U. Washington, EE.UU.) en Chile al inicio del año 2000, y a **Glyn Williams-Jones**, investigador vulcanólogo canadiense interesado en geotermia y en la Laguna del Maule, profesor y codirector del Centre for Natural Hazards Research/Physical Volcanology Group del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad Simon Fraser. Todos dieron su consentimiento para incluir estas entrevistas, las cuales fueron traducidas al castellano y editadas de la conversación original.

Entrevista a Marit Brommer

Realizada por Sofía Otero y Philippe Robidoux, el 3 septiembre de 2020

Philippe: ¿Cómo te iniciaste, llegaste a inspirarte y a lograr familiaridad con la energía geotermal?

Marit: Mi formación académica es en geología y, profesionalmente, inicié mi carrera en la industria del gas y petróleo. Siempre tuve un interés en el ámbito de la ciencia aplicada y también en la industria, en los problemas reales y prácticos. Cuando cursé el doctorado, no lo hice por una vocación académica necesariamente, lo cursé pensando en que esa dedicación a la investigación me abriría puertas en el futuro en cualquier ámbito.

Siempre me ha interesado cómo los seres humanos usamos la energía y cómo desarrollamos innovaciones prácticas, cómo mejoramos el manejo de los recursos, sobre todo en energía.

¿Cómo terminé trabajando en geotermia? La vida presenta cruces de caminos, ya sea por oportunidades que uno crea, por suerte, casualidad, por desarrollo profesional, etc. Para mí, hubo dos temas que se cruzaron

en 2016: primero, yo trabajaba en Shell, y la industria petrolera —una vez más— pasaba por una gran recesión; y en segundo lugar, yo estaba personalmente decepcionada con el mundo y un poco conmigo. El 2015 se había firmado el Acuerdo de París y yo me pregunté si quería invertir todos mis talentos, tiempo y energía en una industria de combustibles fósiles, sentí que era tiempo de participar en una conversación más amplia para explorar caminos alternativos en términos de lo energético. Sentí la necesidad de abandonar el ambiente corporativo, un ambiente que, por lo demás, me moldeó profesionalmente y estoy convencida que sin ello no estaría donde estoy hoy. Aprendí mucho de ahí, pero había llegado el tiempo de movilizarme hacia un escenario más verde, participar en diálogos más amplios y comprender que todos podemos crear una diferencia cuando se trata de un futuro sin carbono.

Y si quería trabajar en energías renovables, siendo geóloga, ¿qué podía elegir? Algo que viniera de la Tierra, del suelo.

Philippe: Pensando en los estudiantes, ¿cuáles son las oportunidades globales para los profesionales y cómo se puede llegar a ser experto en la energía geotérmica?

Marit: Hoy en día hay varias universidades que están creando currículos específicos en geotermia. Así que si quieres convertirte en un o una profesional en geotermia, hay ciertas universidades enfocadas en ello. Aún así, no es un tema popular, la formación en geotermia es de nicho, y debes excavar profundamente para dar con esos lugares y elegir el más apropiado para el camino que cada uno quiere recorrer, ya sea por sus programas o por las personas y la investigación específica que ciertos académicos/as puedan hacer. Para quienes hayan hecho eso, bien. Estarás automáticamente admitido/a en la comunidad geotérmica. Pero existe muchísima gente con grados en geología o afines que si no tuvieron esa formación en sus inicios, la tarea de ingresar en la comunidad puede ser mucho más difícil.

Sofia: En Chile, la geotermia se está recién incorporando en el currículo profesional, ¿cómo es en Europa?

Marit: La mayoría de las universidades son nuevas en la geotermia. Existen excepciones al menos en el hemisferio norte, casos aislados, Suiza, Indonesia, algunas instituciones en Estados Unidos, que llevan décadas trabajando en ello. El resto de las universidades no lleva muchos años y los cursos son escasos. Y además, aparte de lo teórico, las y los estudiantes necesitan experiencia práctica, obtener datos del subsuelo, mapear, estar cerca de proyectos de perforación. ¿De dónde pueden sacarla? No es fácil, es un desafío para nuestra comunidad, porque hay más demanda de experiencia que la oferta que está supliendo la industria geotérmica.

Sofia: ¿Cuál es la experiencia de las mujeres a través el mundo en el sector de la energía geotermal y cuál es tu opinión a propósito de Chile?

Marit: Esto es una observación personal: en el grupo etario de los 20 a los 30, aquellas personas que están entrando a la universidad o a la industria, recién podrán observar que se está alcanzando un balance de género. Pero pasados los 30 es completamente diferente. Mientras más te acercas a las posiciones *senior*, más hombres ves, hasta el punto en que me he preguntado “¿soy la única mujer acá?”.

Existe un enorme llamado para que las mujeres mayores se erijan como modelos a seguir, no para decir cómo hacerlo, sino para que digan “ustedes pueden hacerlo”. La forma de hacerlo, de ganarse un lugar en la industria o la academia, será personal, pero abrir la conversación sobre que es posible alcanzarlo es lo importante. No hay nada que nos detenga.

Philippe: ¿Qué piensas del potencial económico actual en Chile en el sector de la geotermia?

Marit: Tengo una visión general al respecto. Mi visión de Latinoamérica es que es necesario que observen primero el precio de su energía, que es muy bajo. Para que un inversor geotérmico o un capitalista de riesgo se interese, no lo hará por ese precio. Actualmente el escenario es más o menos una invitación a invertir 10 y cobrar 3. Eso no va a pasar. Si el mecanismo de venta es demasiado barato, entonces para explorar, perforar y crear la infraestructura será muy difícil. Este es un marco físico que necesita cambiar. Y segundo, un aspecto crítico es la política, las políticas públicas. ¿Dónde está su ministerio? ¿Está alineado con la geotermia? ¿Qué están diciendo sobre renovables? Si su ministerio de energía no está alineado con promover la geotermia, no se va a conseguir desarrollarla o será extremadamente difícil.

Sofia: El CEGA es financiado por el Estado, nació de la iniciativa de un profesor de la Universidad de Chile que postuló a financiamiento nacional y, con el tiempo, involucró a otras instituciones. Desde tu perspectiva, ¿cómo la experiencia del CEGA puede inspirar a otros países?

Marit: Los primeros pasos que dieron para formar el CEGA son un buen ejemplo para seguir. Primero que nada, se reunieron, generaron un colectivo, y eso es importante. Eso ayuda a construir una agenda, a traer el foco al tema de la geotermia.

El siguiente paso que cambia el juego es lo que están pensando hacer ahora: cómo conectarse con la industria, la sociedad y las voces del gobierno. El CEGA ha cubierto muy bien los aspectos sociales y de comunicación y, por supuesto, la investigación académica de gran calidad, pero si no estás sentado en la mesa de la política, seguirás siendo un grupo pequeño haciendo grandes cosas para otros grupos pequeños.

Philippe: ¿Qué recomendaciones modificarias, mantener o añadir para el futuro del sector geotérmico en Chile?

Marit: Verifiquen por sí mismos si Chile es miembro de IRENA (Agencia Internacional de Energías Renovables), si su país es miembro, su ministro es parte de allí y les puede ayudar a impulsar la agenda. Yo recomendaría a CEGA unirse. Necesitan influencia política, necesitan dejar de ser sólo académicos, porque puedes investigar para siempre, pero necesitas uno o dos miembros del centro que cambien de juego y se conviertan en agentes de influencia que den forma al debate. Chile es visto en el mundo como un faro por diversos motivos, y deben aprovechar esa narrativa.

A la gente de la comunidad geotérmica le gusta hablar con gente de la comunidad geotérmica, pero debemos dejar de hablar solo entre nosotros. Necesitas hablar con los clientes, quién te quiere, quién es tu cliente. Ésa es la discusión que necesitas poner en la mesa.

Entrevista a Jeff Witter y Glyn Williams-Jones

Realizada por Philippe Robidoux y Diego Aravena, el 3 de Julio de 2020.

Philippe: Desde tu punto de vista como inversionista, ¿qué piensas del potencial económico de Chile? ¿Ves mucho potencial para desarrollar la producción de energía?

Jeff: Participé en congresos relacionados a la energía geotérmica y decidí crear una empresa de exploración geotérmica, manteniendo colaboración con la academia. En la década del 2010 estuve en el *Worldbank sponsor meeting* y en el *Geothermal Congress for Latin America and the Caribbean GEOLAC*. Luego, me familiaricé con los emprendedores y financistas relacionados al negocio, observando que los intereses son cíclicos en América Central y del Sur. Además, las legislaciones y normas varían entre países. El entusiasmo con el descubrimiento de Cerro Pabellón y la historia chilena dio lugar a especulaciones.

Glyn: El trabajo de la literatura (como este libro) demuestra que Chile es un buen líder. No es claro si Argentina o Brasil tomarán una posición similar, aunque podrían hacerlo fácilmente. Desde el punto de vista de la vulcanología, muy conectada con los estudios geotérmicos, los volcanes de Canadá y Chile comparten varias similitudes, en el sentido de ser laboratorios naturales remotos e inalterados. Entonces, hay muchas oportunidades. Canadá tiene mucho que aprender de Chile, tanto de las buenas como de las malas experiencias y lo mismo para Chile.

Diego: El CEGA es financiado por el Estado, nació de la iniciativa de un profesor de la Universidad de Chile que postuló a financiamiento nacional y, con el tiempo, involucró a otras instituciones. ¿Cómo se desarrolla la investigación en geotermia en Canadá?

Jeff: Con la burbuja financiera (la crisis de 2007–2008) hubo mucho entusiasmo globalmente y esto se reflejó en Canadá en el sector energía y la exploración de minerales. Hasta 2010, algunos programas de gobierno destinaron fondos a las universidades, que realizaron investigación y publicaron. BC-Hydro (British Columbia Hydro and Power Authority) financió investigación inicial. Los reportes del gobierno de Canadá muestran los exitosos resultados de la academia entre 2008 y 2012. En todo caso, el interés disminuyó después de 2010.

Philippe: ¿Cómo ha evolucionado la exploración geotérmica en Canadá y en qué medida es distinta de la experiencia chilena?

Jeff: Una empresa de electricidad en BC empujó la exploración de 2000 a 2010. Además, una empresa de exploración geotermal descubrió fuentes de calor con KW potenciales, temperaturas y condiciones de permeabilidad ideales, pero esto sucedió entre 2008 y 2010, sin tiempo para que el ciclo de especulación alcanzara a dar una oportunidad a que los intereses públicos aumentaran mientras las compañías privadas claramente mostraban potencial. ¿Se ve Chile a sí mismo como líder?

Diego: Sí, económicamente, pero no tanto políticamente.

Glyn: La narrativa del descubrimiento es clave para la promoción de la energía geotérmica (Jeff está de acuerdo con eso). Si tomamos el ejemplo de Canadá, los gobiernos no tomaron la oportunidad de promover la geotermia, que competía con los hidrocarburos y la energía hidroeléctrica. En la diversidad de formas de energía, claramente la extracción de hidrocarburos y la hidroelectricidad tenían mayor *lobby* a escala mundial.

Diego: ¿Cómo fue el desafío de trabajar en Chile, con la gente local en ciudades y sectores rurales?

Jeff: Fue una experiencia positiva. Es un desafío, culturalmente hablando, aunque aún con las barreras de lenguaje, la gente en Chile sabe cómo reírse de cualquier situación (acentos, expresiones, etc.). Yo adopté un acento costarricense al hablar español, luego encontré que el acento chileno es divertido para los extranjeros. Con tanta diversión, tuve que volver por mi doctorado. Ahí fue cuando conocí a profesionales de SER-NAGEOMIN y mis viajes fueron muy agradables.

Glyn: La investigación en Chile fue una buena experiencia e insisto en que el modo de interactuar con la gente es importante antes de cualquier pregunta de investigación. Hay que tomarse el tiempo para conversar y así los proyectos funcionan bien. Por ejemplo, el guardia de Laguna del Maule estaba involucrado y dispuesto a ayudar, la gente de los mercados fue amable durante las campañas, me acuerdo de ese guardia que es todavía una referencia y conoce todas las historias.

Diego: ¿Qué harías como inversionista o como investigador si planearas ir a Chile?

Jeff: Como inversor, el potencial es enorme. Sobre todo, trabajar con la academia, las universidades y lograr que los privados y el gobierno participen en proyectos futuros. Quiero ir de vacaciones a Chile, pero también estoy feliz de ir a hacer investigación y evaluar el potencial geotérmico.

Glyn: Como investigador, la perspectiva de la vulcanología es fantástica. Disfruto los enfoques multidisciplinarios y veo a Chile como un paraíso para la vulcanología, ¡demasiados volcanes para los vulcanólogos! También hay que mencionar que Chile se usa como ejemplo para estudiar los volcanes en Canadá (para monitoreo y modelos).



LA VOLUNTAD

Capítulo VI

Actores políticos y geotermia: el rol del Estado chileno y sus discursos

Capítulo VII

Geotermia y sociedad: reflexiones a partir de intervenciones sociales

Capítulo VIII

Aysén, piloto geotérmico

CAPÍTULO VI

Actores políticos y geotermia: el rol del Estado chileno y sus discursos

Miguel Saldivia y Cecilia Ibarra

1. Introducción

El Estado ha sido considerado como el actor más importante en el diseño e implementación de la política energética.¹ Razones como la seguridad energética o el cambio climático han impulsado al Ejecutivo a tener un rol más activo en una industria que, en países como Chile, ha estado controlada principalmente por actores privados.² El caso de la geotermia en Chile no es la excepción, la voluntad del Estado, expresada a través de la postura de las autoridades de turno, ha sido fundamental en el desarrollo de la exploración y explotación de la geotermia en el país.

Este capítulo tiene como objetivo principal identificar los actores y decisiones que han sido determinantes en el desarrollo de la geotermia en Chile, de manera de construir un relato histórico que permita un análisis en perspectiva de la relevancia de esta fuente de energía, a partir del contexto institucional, incluyendo los aspectos políticos y regulatorios. Este relato se construye desde la intervención del Estado, a través de sus distintos poderes (Ejecutivo, Legislativo y Judicial). Su relación con otros actores —como figuras del mundo privado, académico o científico— nos permiten identificar las narrativas asociadas a este tipo de energía y algunos rasgos característicos de la identidad geotérmica y su evolución en el tiempo. Esto es particularmente interesante si se compara con otras fuentes de generación energética, en especial, con otras renovables. Esos discursos, por ejemplo, ayudan a reconocer si se asocia a la geotermia con un recurso estratégico, estatal, prioritario, sujeto de explotación privada, comunitario o limpio, entre otras cualidades. Bajo este análisis, el capítulo plantea que el discurso de la geotermia ha mutado en el tiempo, estos cambios se muestran desde el punto de vista del Estado que no ha tenido un discurso único ni constante, sino que los discursos y los énfasis han cambiado dentro de las instituciones.

Con el fin de identificar el rol del Estado como actor en el desarrollo de la geotermia en Chile, así como sus discursos relacionados con esta fuente de energía, la metodología de este capítulo comprende la revisión

¹ Llewelyn Hughes and Phillip Y. Lipsky, *The Politics of Energy, Annual Review of Political Science* 2013 16:1, pp. 449-469.

² Chile ha sido reconocido como el primer país en privatizar los tres sectores de los servicios de suministro de electricidad, es decir, la generación, transmisión y distribución. Ver: Francisco Muñoz et al., "Electricity market design for low-carbon and flexible systems: Room for improvement in Chile", *Energy Policy*, 2021, 148, pp. 1-15.

de los siguientes documentos oficiales: (i) cuentas públicas de todos los presidentes de la República desde la década de los 60 en adelante, en relación con las referencias a temas de energía y, eventualmente, menciones expresas a la geotermia, (ii) las legislaciones sobre geotermia aprobadas en el Congreso y que hayan sido propuestas por mensaje presidencial o por moción parlamentaria, incluyendo la historia de la ley con las intervenciones de parlamentarios y expertos, (iii) los proyectos de ley que han sido rechazados o que aún se encuentren en discusión, (iv) informes de expertos guardados en las bibliotecas de la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) y del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (Sernageomin) y (v) las principales sentencias de casos judiciales relacionados con conflictos sobre energía geotérmica resueltas por la Corte Suprema y por las cortes de apelaciones en los últimos años.

La segunda sección de este capítulo aborda la voluntad política emanada desde el Poder Ejecutivo, que se expresa mediante la posición de distintos presidentes de la República en el fomento de la geotermia y cómo esa voluntad política (o falta de ella) influyó en hitos concretos de este sector, como las relaciones del Estado chileno con otros organismos nacionales e internacionales. La tercera sección analiza el rol del Poder Legislativo, es decir, se centra en la postura de parlamentarios que han intervenido y votado, ya sea a favor o en contra de la regulación geotérmica. La cuarta sección aborda el papel que ha jugado el Poder Judicial, donde los actores son aquellos jueces que se han pronunciado sobre conflictos vinculados a la geotermia. Finalmente, la sección quinta propone, a modo de conclusión, una caracterización de la geotermia basada en los discursos del Estado a través del tiempo y de los distintos actores.

2. La voluntad política de La Moneda

Esta sección hace un recorrido histórico por la postura del Estado chileno sobre la geotermia, manifestada directamente a través de los presidentes de la República o mediante distintos organismos públicos. Este relato se construye a partir de actuaciones, discursos, resoluciones o hitos protagonizados por los mandatarios y que han tenido un impacto en el desarrollo de la geotermia. En particular, se examina la mención (o ausencia) de esta fuente de energía en las cuentas públicas que los presidentes realizan cada año en el Congreso Nacional. En estos discursos se hace referencia a los proyectos del gobierno y a los recursos que se les asignan. También es común que las iniciativas del Ejecutivo se den en el marco de acciones de cooperación internacional, en estos casos el presupuesto nacional tiene una contraparte que aporta y a la que se debe rendir.

En términos de historia de la explotación de la geotermia en Chile, se ha planteado que existen tres etapas lideradas por diferentes instituciones: (1) 1908-1923: promoción de la colonia italiana; (2) 1968-1978: inversión estatal chilena; (3) 2000-presente: inversión privada con el gobierno chi-

leno actuando como regulador.³ Esta división se ha repetido a lo largo de los años, y permite identificar los principales actores ligados a la geotermia, por ejemplo, el Estado, primero en su rol como desarrollador y, luego, como regulador, y a los privados como concesionarios en la última etapa a partir del año 2000.

Uno de los hitos que marca la segunda etapa histórica fue la implementación del convenio de colaboración del gobierno chileno con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) para la exploración geotérmica suscrito en 1967 y ejecutado desde 1968 en adelante. Sin embargo, en estas etapas históricas se han omitido algunos informes encargados por el Estado, a través de agencias y universidades públicas, para evaluar el potencial geotérmico que datan mucho antes de 1968. En esos años, es posible identificar un rol del Estado enfocado en la exploración previa al desarrollo de proyectos. Asimismo, se han omitido las decisiones adoptadas durante el gobierno de Jorge Alessandri Rodríguez, desde 1962 en adelante, y que dieron un impulso potente a la geotermia. De hecho, desde Alessandri, todos los mandatarios han tenido, con mayor o menor intensidad, algún grado de participación en el desarrollo de este sector energético.

A continuación, se revisan, una a una, las acciones del Ejecutivo durante los distintos períodos presidenciales.

2.1. El Estado explorador (1940-1962)

Con fecha 26 de octubre de 1940, Juan Brügggen, geólogo de la Universidad de Chile, elaboró un informe por encargo del entonces Departamento de Minas y Petróleo del Ministerio de Fomento, sobre los géiseres de los volcanes de El Tatio.⁴ Este documento podría constituir uno de los primeros antecedentes oficiales del gobierno chileno sobre exploración geotérmica. Este informe fue emitido un año después de la creación de la CORFO, en cuyo directorio participaba el ministro de Fomento. La CORFO fue creada por el gobierno de Pedro Aguirre Cerda, en abril de 1939, tres meses después de un terremoto y con el objetivo de fomentar el desarrollo productivo del país.⁵ Décadas después, la CORFO tendría

³ Pablo Sánchez-Alfaro et al., *Geothermal barriers, policies and economics in Chile – Lessons for the Andes, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51 (2015) pp. 1390–1401; Alfredo Lahsen, Mauricio Muñoz, Miguel Ángel Parada, “Geothermal development in Chile”, *Proceedings of the world geothermal congress 2010, Bali, Indonesia*; 25–30 April 2010; Alfredo Lahsen, Fabián Sepúlveda, Juan Rojas, Carlos Palacios, “Present status of geothermal exploration in Chile”, *Proceedings of the world geothermal congress 2005, Antalya, Turkey*; 24–29 April 2005; Pablo Sánchez, Diego Morata, Alfredo Lahsen, Diego Aravena, Miguel Ángel Parada. “Current status of geothermal exploration in Chile and the role of the new Andean Geothermal Center of Excellence (CEGA)”. *Geotherm Resour Couns Trans* 2011; 35: pp. 1215–1218.

⁴ Informe Geológico sobre los Geisers “Volcanes del Tatio”, elaborado por Juan Brügggen, con fecha 26 de octubre de 1940, por encargo del Ministerio de Fomento, disponible en el Archivo de la Biblioteca del Sernageomin.

⁵ La Corporación de Fomento de la Producción fue creada por la Ley N° 6.334, del 29 de abril de 1939. Con su creación, se culminó una década de debate sobre el modelo de desarrollo económico que debía seguir el país. el cual asignaba al Estado, el rol rector de todo el aparato productivo nacional, mediante el diseño e implementación de un vasto programa tanto de planes sectoriales, como de la realización de investigaciones.

un rol clave en la implementación del convenio de colaboración con el PNUD.

El 26 de septiembre de 1946, el ingeniero Plinio Brighanti emite desde Milán un nuevo informe para el gobierno chileno encargado a través de la CORFO. Dicho reporte tenía como objetivo evaluar la capacidad de El Tatio y su comparación con Landerello, zona de alto potencial geotérmico ubicada en Italia. El informe fue concluyente en reconocer que en “El Tatio existen cantidades importantes de vapor y que de allí se pueden obtener, a costos inferiores a cualquier otro, cantidades importantes de energía eléctrica”.⁶

En la misma línea, el ingeniero Angelo Filipponi, por encargo de la Universidad Técnica Federico Santa María, hizo un estudio para comparar las características de El Tatio con Landerello.⁷ En su informe emitido en 1953, indica que es “evidente que al poderse utilizar la energía disponible, todo el Norte de Chile podría beneficiarse con energía eléctrica a bajo precio, la que daría un gran impulso al desarrollo industrial”.⁸ Filipponi, en ese mismo informe, se refiere al geólogo contratado por la Comunidad de El Tatio, señor Ettore Tocchi, y a un perforista de gran experiencia, ambos de Lardarello. En su informe, que data del año 1921, Tocchi llega a las siguientes conclusiones: a) La cantidad de vapor que surge de los géiseres de El Tatio es superior a la de las fumarolas de Lardarello, y b) que sin exageración, podría obtenerse en El Tatio una potencia enorme que se hace difícil de apreciar.⁹

Por su parte, el geólogo Ricardo Fenner emitió otro informe en 1956, mientras que en 1962 J.P. Mathiez, consejero técnico de Naciones Unidas elaboró un informe denominado “Investigaciones Necesarias para Evaluar la Capacidad del Campo del Tatio”. Allí se indicaba que el campo del Tatio ha sido estudiado desde 1922 por varios geólogos, ingenieros y economistas, tales como Brüggén, Brighanti, Fenner, Filipponi y Tocchi.¹⁰

Otro evento internacional que se debe rescatar fue la conferencia internacional de Naciones Unidas sobre nuevas fuentes de energía, realizada en Roma entre el 21 y 31 de agosto de 1961. En la ocasión, Filipponi expuso sobre el potencial de El Tatio y su comparación con Landerello.

⁶ “Informe sobre la zona geotérmica del Tatio”, elaborado por Plinio Brighanti, 1946, disponible en el Archivo de la Biblioteca del Sernageomin.

⁷ “Informe sobre la zona geotérmica del Tatio”, de 1946, disponible en el Archivo de la Biblioteca del Sernageomin.

⁸ Informe emitido por el ingeniero Angelo Filipponi, por encargo de la Universidad Técnica Federico Santa María, 1953.

⁹ *Ibid.*

¹⁰ Informe emitido por J.P. Mathiez, consejero técnico de Naciones Unidas, denominado “Investigaciones Necesarias para Evaluar la Capacidad del Campo del Tatio”, 1962.

2.2. Alessandri, el presidente que tuvo fe en la geotermia (1958-1964)

En 1962, el mismo año en que Chile era anfitrión del mundial de fútbol, el presidente Jorge Alessandri marcó un hito importante para impulsar la geotermia en Chile. Mediante el Decreto N° 4084, del Ministerio de Hacienda, suscrito el 12 de septiembre de 1962, y publicado en el Diario Oficial el 19 de octubre de ese año, Alessandri aprobó los estatutos y constitución de la empresa estatal denominada “Geotérmica del Tatio Sociedad Anónima”.

Los estatutos quedaron plasmados en la escritura pública de fecha 25 de junio de 1962, otorgada ante el notario de Santiago Herman Chadwick Valdés. La principal misión de la entidad estatal sería la explotación del recurso energético en el norte chileno. De acuerdo con los estatutos, “la sociedad tendrá por objeto la exploración, explotación, transformación y aprovechamiento industrial y comercial no sólo de las substancias minerales contenidas en los vapores sino también de cualquier otra substancia mineral y de la energía geotérmica existente en la región del Tatio, provincia de Antofagasta, con el fin de producir energía eléctrica, pudiendo la sociedad dedicarse a actividades anexas o similares y complementarias”.¹¹ Los accionistas de la empresa estatal eran la CORFO y la Sociedad Minera Explotadora del Tatio, dueña a la fecha de las pertenencias mineras sobre las que se realizaría la exploración geotérmica.

La constitución de una empresa estatal para explotar el recurso geotérmico fue un impulso potente del gobierno de Alessandri. Era la primera vez que se intentaba aplicar un modelo de Estado “desarrollador”. Décadas más tarde, la empresa Geotérmica del Tatio sería titular del fallido proyecto del mismo nombre, ubicado en la Región de Antofagasta.¹²

El entusiasmo de Alessandri por explotar la geotermia coincidía con el debate internacional sobre el derecho soberano que tienen los países sobre sus recursos y que, justamente, era plasmado en una declaración de Naciones Unidas del mismo año 1962, mediante la Resolución N° 1803 de la Asamblea General que estableció el Principio de Soberanía Permanente sobre los Recursos Naturales.

Esa declaración fue una respuesta al proceso de colonización donde los recursos de algunos países fueron explotados por parte de sus colonizadores.¹³

Durante el gobierno de Alessandri también se dictó la primera ley que mencionaba a la geotermia, aunque brevemente. Se trata de la Ley General de Servicios Eléctricos, el Decreto con Fuerza de Ley 4, del 31 de agosto

¹¹ Escritura pública de fecha 25 de junio de 1962, otorgada ante el notario de Santiago Herman Chadwick Valdés.

¹² Actualmente, la empresa estatal Geotérmica del Tatio S.A. aparece “en liquidación”. Ver registro en Comisión para el Mercado Financiero: <https://bit.ly/3DwFmzR>

¹³ Temitope Tunbi Onifade, “Peoples-Based Permanent Sovereignty over Natural Resources: Toward Functional Distributive Justice?”. *Human Rights Review* 16, pp. 343–368 (2015).

de 1959, dictado por el mandatario en uso de las facultades delegadas por la Ley N° 13.305. Dicha ley se refería incidentalmente a la energía geotérmica en su artículo 1° al señalar que están comprendidas en las disposiciones: “Las Concesiones para establecer, operar y explotar: a) Centrales térmicas productoras de energía eléctrica, entendiéndose por térmicas las que emplean combustibles, energía geotérmica, energía solar, energía nuclear o cualquiera otra fuente que no sea el agua”.

Esta norma implicaba que las concesiones de centrales térmicas, incluidas aquellas en base a geotermia, requerían una concesión del Estado para poder operar. Este requisito cambió en 1982, cuando se dictó una nueva Ley General de Servicios Eléctricos, Decreto con Fuerza de Ley 1, la que dejó fuera de su campo a las centrales térmicas, permitiendo que éstas puedan instalarse libremente sin necesidad de una concesión especial del Estado.

Como ya se ha indicado, durante este mandato de Alessandri también se gestó el convenio entre CORFO y el PNUD, colaboración que fue antecedida por varios años de informes e investigaciones solicitados por agencias y universidades públicas.

Pese a lo anterior, en las cuentas públicas anuales del presidente Alessandri, pronunciadas entre los años 1958 y 1964, no hay mención a la geotermia.

2.3. Frei Montalva y el apoyo de las Naciones Unidas (1964-1970)

Cuando Eduardo Frei Montalva asume la presidencia del país, la CORFO ya se había interesado por el potencial de la geotermia para la generación de electricidad. Los informes de ingenieros y geólogos daban cuenta del potencial promisorio de los recursos nacionales, y en 1965 la CORFO patrocinó una solicitud para pedir la asistencia de Naciones Unidas.¹⁴

La solicitud del gobierno chileno de apoyo para la exploración de recursos geotérmicos en el norte de Chile fue aprobada en junio de 1965 por el consejo directivo del organismo internacional. El plan de operación fue firmado el 16 de enero de 1967 y el trabajo de campo comenzó el 14 de marzo de 1968. En dicho convenio, la CORFO fue designada como la agencia gubernamental cooperadora. En términos monetarios, la contribución del PNUD fue de 1.917.701 dólares, es decir, alrededor de 710 millones de escudos de la época. El objetivo incluía la evaluación de recursos geotérmicos en 108 mil kilómetros cuadrados ubicados en las provincias de Tarapacá y Antofagasta, y principalmente en tres áreas: El Tatio, Puchuldiza y Suriri.¹⁵

¹⁴ Cámara de Diputados de Chile. *Acta de Aprobación de proyecto de ley en la Comisión de Hacienda*, 1970.

¹⁵ PNUD. *Survey for geothermal development in Northern Chile. Report on Project Results, Conclusions and Recommendations*. United Nations, New York, 1975.

Como resultado del convenio con el PNUD, en 1968 se iniciaron las exploraciones geotérmicas en Chile. Para llevar a cabo este convenio, la CORFO creó el Comité para el Aprovechamiento de la Energía Geotérmica, cuya función fundamental fue “programar, dirigir y realizar investigaciones y trabajos en las zonas que existan recursos geotérmicos, encaminados a establecer las posibilidades más adecuadas de explotación de los mismos”.¹⁶ Paralelamente, la CORFO continuó efectuando mediciones y publicó un estudio de factibilidad que consideraba la instalación de una central geotérmica de 30 megavatios y estimaba un potencial instalable de 100 megavatios.¹⁷

Pese a estas gestiones, no existen referencias a la geotermia en las cuentas públicas de Frei Montalva.

2.4. Allende y la continuidad de la explotación estatal (1970-1973)

Durante el mandato de Salvador Allende se mantuvo en operación el proyecto del PNUD y también el Comité para el Aprovechamiento de la Energía Geotérmica de CORFO. El 10 de marzo de 1971 se prolongó la extensión del plan de operación con el PNUD hasta fines de 1972. Luego, el 17 de junio de 1973, se volvió a extender por un año más.

En paralelo, en 1970, la Comisión de Hacienda de la Cámara aprobó con fecha 8 de julio de 1970, un proyecto de ley que establece el dominio del Estado sobre todos los recursos geotérmicos del país. Para ese entonces, ya se reconocía la calidad de estratégica de la energía geotérmica.

Por lo mismo, no llama la atención que, de acuerdo con un documento elaborado por la Agencia Central de Inteligencia (CIA) de Estados Unidos, titulado “La Economía Chilena: La Herencia de Allende y Acciones Probables”, la geotermia seguía formando parte de la actividad productiva del Estado. En la lista de empresas estatales, se menciona la Sociedad Geotérmica del Tatio, en la que el Estado mantenía una participación del 51%.

2.5. La apuesta de Pinochet y el financiamiento internacional (1973-1990)

El primer mensaje presidencial del comandante en jefe del Ejército Augusto Pinochet se tituló “Un año de Construcción”. 11 de septiembre de 1973-11 de septiembre de 1974 y reemplazó a la tradicional cuenta pública del 21 de mayo. En su intervención, Pinochet informó al país del Programa Geotérmico e indicó que: “Se realiza, en convenio con el Fondo Especial de las Naciones Unidas, el estudio del potencial geotérmico de

¹⁶ Miguel Saldivia, “Barreras a la entrada de la geotermia en Chile” (Memoria para optar al grado académico de Licenciado en Ciencias Jurídicas y Sociales, Facultad de Derecho de la Universidad de Chile, 2013, p. 12); Alfredo Lahsen, “Origen y potencial de energía geotérmica en los Andes de Chile”. *Geología y Recursos Minerales de Chile*, Chile: Edit. Univ. de Concepción, 1985, p. 425.

¹⁷ Historia de la Ley N° 19.657, p. 21.

El Tatio, en Antofagasta, poniéndose en explotación seis pozos”. Además, agregó que “se finalizaron los antecedentes para el proyecto de factibilidad para la instalación de una Central Geotérmica que abastecerá de energía a esa provincia (de Antofagasta), principalmente (para) sus actividades mineras”.¹⁸ En su discurso, también detalló que la inversión para estas actividades durante ese año sería de 610 millones de escudos de la época y 168 mil dólares.

Pinochet dio continuidad al proyecto iniciado en 1967 con el PNUD y que finalizó entre septiembre de 1975 y agosto de 1976. En 1975, de hecho, el gobierno chileno entregó al PNUD el informe sobre los resultados del proyecto, y en su cuenta pública de 1975, Pinochet visó la continuidad del trabajo del Comité Geotérmico de CORFO creado en la década anterior. Su discurso hace referencia a la falta de fuentes de energía en el norte del país y la necesidad de encontrar alternativas.

En el informe al PNUD de 1975 sobre los resultados del proyecto, se hablaba de la geotermia como “energía indígena”,¹⁹ un concepto en desuso actualmente, pero que recogía el carácter local de esta fuente de energía renovable. Entre las recomendaciones del informe, se indicó que “en consideración al alto costo de los combustibles importados, se debe adoptar inmediatamente la decisión de construir una planta de energía eléctrica de 15 MW en El Tatio a partir de 1978”.²⁰ Asimismo, se indicó que una “legislación relativa al desarrollo y explotación de la energía geotérmica en Chile es de vital importancia”.²¹ En ese sentido, se recomendó que se reactivara un borrador de regulación que se había redactado cuatro años atrás. En la práctica, ese marco regulatorio sólo sería aprobado más de 30 años después.

En su cuenta pública de 1976, Pinochet informó de los resultados del convenio, y de la factibilidad de instalar una planta geotérmica en El Tatio con una capacidad de 15500 KW. El Comité geotérmico daría continuidad a esta área de desarrollo energético para el norte del país, donde se estaban terminando exploraciones en Puchuldiza. El discurso planteó las posibilidades de desalinizar agua para consumo de la población y recuperar minerales de las aguas tratadas. En estos primeros años de la dictadura la cooperación internacional en geotermia no solo se dio a través del convenio con el PNUD, existieron además un convenio con el Reino Unido, para evaluar una planta de desalinización en 1974, y con la cooperación

¹⁸ Gobierno de Chile. *Un año de construcción, 11 de septiembre de 1973 – 11 de septiembre de 1974*. Santiago de Chile, septiembre de 1974. Disponible en: <http://www.memoriachilena.gob.cl/602/w3-article-82400.html> (última consulta 31 de enero de 2022).

¹⁹ PNUD. *Survey for geothermal development in Northern Chile. Report on Project Results, Conclusions and Recommendations*. United Nations, New York, 1975, pp. 1, 15.

²⁰ *Ibíd.*, p. 23.

²¹ *Ibíd.*, p. 26.

japonesa (JICA) para continuar con las exploraciones en el norte después de terminado el convenio con el PNUD.²² Estos años se caracterizaron por altos precios del petróleo a partir de 1973 y la guerra de Yom Kipur, precios que se mantuvieron hasta fines de los años ochenta.²³

En las cuentas públicas de 1977 y 1978 los énfasis cambian, en 1977 se habla de la “*promoción* de una planta geotérmica en El Tatio” (énfasis agregado), del programa de prospección y de la colaboración entre ENAP y la CORFO, pero ya no abundan los detalles de los trabajos ejecutados y por ejecutarse. En el discurso de 1978, el mensaje hizo expresa referencia a “la acción subsidiaria del Estado en el marco de las actividades productivas” y en esta línea, la función de CORFO consiste en identificar áreas de inversión, mediante la prospección de recursos naturales, “centrando su línea de acción en la prospección de energía geotérmica en la zona norte y de recursos carboníferos e hidroeléctricos en la zona sur del país”.²⁴

Posteriormente, en 1980, se realizaron otros estudios para evaluar el potencial del campo. Sobre la base de las mediciones que se llevaron a efecto, se concluyó que el campo podría soportar una central de 30 megavatios. Sin embargo, una central de 15 megavatios aparecía como más segura. Lo anterior no quiere decir que el potencial no pueda ser mayor; pero para esta determinación es preciso profundizar las investigaciones. Como conclusión de los estudios, se determinó que, para la realización de una primera planta, ésta debía estar precedida por una serie de trabajos previos, incluyendo mediciones de los pozos y perforación de nuevos pozos. Esto, con objeto de cuantificar el posible potencial con las nuevas técnicas y analizar la posibilidad de una planta de mayor potencial.

El rol subsidiario del Estado en geotermia es más evidente en los discursos de los años siguientes. En la cuenta pública de 1979, Pinochet habló de la “*promoción*” que hace la CORFO para la construcción de la central de El Tatio, y que continúa, además, con los estudios de prospección del potencial del campo geotérmico en Puchuldiza. En 1980, en la cuenta se anunció que se contemplaba la licitación al sector privado para la construcción de plantas geotérmicas en ambos sitios. Finalmente, en la cuenta de 1981, Pinochet afirmó que el traspaso de una planta en El Tatio a la iniciativa privada significaría una producción de 107 GWh y empleo para 40 personas. En este mismo discurso, se informó del término de las actividades del Comité Geotérmico previsto para 1981.

En junio de 1978, se creó el Ministerio de Energía y la Comisión Nacional de Energía (CNE) mediante el Decreto Ley N° 2.224. El artículo 3° de esta ley incluye expresamente a la geotermia como un tipo de

²² Alfredo Lahsen et al. 2005, resumido en Bona y Coviello, 2016.

²³ Alex Spelling, ‘Recrimination and reconciliation’: Anglo-American relations and the Yom Kippur War, *Cold War History*, 13:4, 2013, pp. 485-506.

²⁴ Cuenta pública de Augusto Pinochet Ugarte, 1978.

energía. En ese entonces, el ministerio no llegó a funcionar, pero sí lo hizo la CNE, que sigue vigente hasta hoy. Dicho organismo fue dirigido por el general Herman Brady entre 1981 y 1990. En 1980 la CNE contrató a una empresa extranjera para actualizar la información sobre los pozos productores y el campo geotérmico.²⁵ Las únicas menciones a la geotermia en las cuentas presidenciales después del cierre del Comité Geotérmico en 1981 fueron para indicar que el asunto era competencia de la CNE.²⁶ Por último, en el mensaje presidencial de 1986, se anunció el proyecto de ley para regular el régimen de concesiones geotérmicas y establecer las condiciones para la exploración y explotación de estos recursos. Si bien este proyecto de ley no prosperó, dio cuenta del intento de Estado en la provisión de “reglas del juego” para el desarrollo privado en el marco de su rol subsidiario.

En 1984 la CORFO llamó a una licitación internacional para la venta de sus activos y derechos relacionados con el proyecto geotérmico de El Tatio. A dicha licitación, sin embargo, no se presentó ningún proponente debido a la supuesta falta de un marco legal que regulase la exploración y la explotación de la energía geotérmica en Chile, lo que habría desincentivado a los interesados.²⁷

2.6. Aylwin y la búsqueda de certeza legal para la geotermia (1990-1994)

El 6 de diciembre de 1991, Patricio Aylwin, el primer presidente chileno tras el retorno a la democracia, fue quien firmó el mensaje presidencial para proponer la primera ley sobre geotermia en Chile. Dicha decisión había sido impulsada por dos cercanos al presidente: el entonces ministro de Minería, Juan Hamilton, y el ministro presidente de la Comisión Nacional de Energía, Jaime Tohá.

En su mensaje al Congreso, Aylwin señaló que “la incertidumbre legal que existe en cuanto al dominio y uso de dicha energía constituye un obstáculo a la realización de inversiones, las que necesariamente deben tener un volumen significativo para lo cual se requiere una legislación general que ampare el desarrollo de esta actividad”.

Esta propuesta fue valorada ampliamente durante la discusión en el Congreso. “El gobierno de don Patricio Aylwin tuvo la visión de valorar las posibilidades, en Chile, de la energía geotérmica y llegó a la conclusión de que era conveniente establecer las normas legales por las cuales se regirán las inversiones de los interesados en desarrollar proyectos para su uso; por eso, estamos discutiendo este proyecto. Entonces, lo primero que debemos preguntarnos es si en Chile hay recursos de esta clase que puedan ser explorados y explotados”, dijo el diputado DC Joaquín Palma

²⁵ Cuenta pública de Augusto Pinochet Ugarte, 1980.

²⁶ Cuentas públicas de Augusto Pinochet Ugarte de 1982, p. 501, y de 1983, p. 523.

²⁷ Historia de la Ley N° 19.657, p. 105.

durante la discusión de la ley. El senador RN de la época Miguel Otero también indicó en el Congreso que “en el gobierno del presidente Aylwin se dio un nuevo impulso a un proyecto de ley sobre geotermia, por existir intenciones de inversiones internacionales en esta área, por más de cien millones de dólares”.

Sin embargo, la posición de Aylwin no quedó plasmada en ninguna de sus cuentas públicas (1990-1993). En su discurso de 1990, la única mención a temas de energía fue una alusión a la valiosa cooperación de las instituciones de la Defensa en el campo de la energía, como ocurre en la Comisión Chilena de Energía Nuclear.²⁸ Ciertamente ese comentario reafirma la idea que, para ese entonces cuando se acababa de recuperar la democracia, era prioridad fortalecer las relaciones entre civiles y militares. En 1991 la cuenta pública incluía avances en energía, pero el mandatario omitió leer esos párrafos apelando a la brevedad. Nuevamente el discurso energético no era prioritario.²⁹ Sin embargo, al año siguiente, el discurso presidencial resaltó la “necesidad de obtener crecientes niveles de racionalización en el uso de la energía y en su efecto sobre el medio ambiente”. En todo caso, tampoco hubo referencia a las renovables, como la geotermia, sino que más bien se destacó la puesta en funcionamiento y la construcción de centrales hidroeléctricas y termoeléctricas.³⁰ Finalmente, en 1993, en su última cuenta pública como mandatario, Aylwin volvió a plantear la “necesidad de conciliar las impostergables necesidades del crecimiento económico con la también necesaria preservación del medio ambiente” y aludió al inicio de un programa nacional de uso eficiente de la energía.³¹

Pese la ausencia de la geotermia en los discursos públicos, durante el gobierno de Aylwin reapareció la colaboración internacional para el desarrollo de este tipo de energía.

2.7. Frei y el nacimiento del sistema de concesiones (1994-2000)

Solo a dos meses de terminar su mandato, en enero de 2000, Eduardo Frei Ruiz-Tagle promulgó y publicó la Ley de Concesiones Geotérmicas. Se trataba de la primera legislación en el país que regulaba la exploración y explotación del recurso geotérmico. Con ese hito, se inició el sistema concesional de geotermia que rige hasta hoy.³²

Debido a la relevancia de esta regulación, Frei la había mencionado en su cuenta pública de 1996, cuando señaló que “se encuentra bastante avanzado en el Parlamento el proyecto de ley sobre energía geotérmica”.

²⁸ Cuenta pública de Patricio Aylwin Azócar, 1990.

²⁹ Cuenta pública de Patricio Aylwin Azócar, 1991.

³⁰ Cuenta pública de Patricio Aylwin Azócar, 1992.

³¹ Cuenta pública de Patricio Aylwin Azócar, 1993.

³² Ley N° 19.657, sobre Concesiones de Energía Geotérmica, publicada en el Diario Oficial con fecha 7 de enero de 2000.

Sin embargo, hay que recordar que este proyecto de ley había sido enviado al Congreso por el gobierno anterior. Por lo demás, en la misma cuenta de 1996, al referirse a los temas de energía, Frei destacó el “gran avance” en los proyectos de distribución de gas natural proveniente de Argentina.³³ Efectivamente, la prioridad para Frei era la inversión y regulación del gas, como queda de manifiesto en todas sus cuentas públicas entre los años 1994 y 1997.³⁴

Solo en 1999, el entonces mandatario llamó a “reformular la matriz de desarrollo energético del país, equilibrando las fuentes hidroeléctricas y termoeléctricas (...) a fin de asegurar el abastecimiento normal en todo tipo de condición climática”. En ese momento, aludió a las energías renovable, aunque solo llamándolas “alternativas innovadoras”.³⁵

2.8. Lagos y el giro en las prioridades energéticas (2000-2006)

El 28 de abril de 2000, el entonces presidente Ricardo Lagos Escobar firmó el Reglamento Especial que Identifica Fuentes Probables de Energía Geotérmica. Sin embargo, esta normativa se venía preparando por el Sernageomin desde el gobierno anterior y Lagos solo la suscribió a un mes de asumir su mandato.

Durante su mandato, también se constituyó la empresa estatal Geotérmica del Norte S.A. Según sus estatutos, la entidad fue creada por la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP) y la Corporación Nacional del Cobre de Chile, con objetivos de investigación, exploración y explotación de los yacimientos geotérmicos en las regiones del norte chileno.³⁶ Después de la fallida experiencia con Geotérmica del Tatio S.A., esta fue la segunda ocasión en que el Estado creaba una empresa para el desarrollo geotérmico. Actualmente, Geotérmica del Norte S.A. es la titular del proyecto Cerro Pabellón.

Pese a lo anterior, al revisar las cuentas públicas, queda en evidencia que Lagos no aludió al sector energético en sus discursos entre los años 2000 a 2003. Solo en 2004 se refirió a temas de energía. En esa oportunidad mencionó a la geotermia, aunque sus prioridades apuntaban hacia otro lado: la importación de gas desde Argentina. “Cierto, nuestro gran capital energético es el agua. Pero también es cierto que no podemos depender solo del agua”, dijo Lagos. “Necesitamos, entonces, energía segura, limpia y barata. En ese orden. Por ello, nos abrimos al gas natural que viene desde Argentina. Ahorramos miles de millones y seguimos ahorrando porque es un gas más barato. Si hay problemas de abastecimiento, nuestras plantas también pueden funcionar con petróleo o con carbón. Son menos limpias,

³³ Cuenta pública de Eduardo Frei Ruiz-Tagle, 1996.

³⁴ Cuentas públicas de Eduardo Frei Ruiz-Tagle, 1994-1997.

³⁵ Cuenta pública de Eduardo Frei Ruiz-Tagle, 1999.

³⁶ Escritura pública de fecha 2 de enero de 2001, otorgada ante el notario de Santiago José Musalem Saffie.

pero funcionan”, agregó Lagos ante el Congreso pleno.³⁷

Y aunque el mandatario reconoció que los cortes de gas desde Argentina provocaron críticas a la política energética, él defendió la inversión en los gasoductos que cruzaban la cordillera de los Andes: “Algunos hablaron de una errónea política energética del gobierno. Esto no es así, señores. Chile llevó adelante en los últimos diez años una acertada política de diversificación de nuestra energía”. Luego, añadió que “esto no quiere decir que no haya que seguir desarrollando proyectos energéticos con agua, con carbón, con petróleo, con geotermia. Lo que pasa es que si necesitamos *gas-gas* como lo necesita ENAP o como se necesita para los 800 millones de dólares de inversión que está enterrada cuando tenemos las cañerías que abastecen nuestros hogares, tenemos que tener la seguridad también de gas para esos hogares, y eso es lo que estamos haciendo”.

Al año siguiente, el tema energético se había vuelto urgente, principalmente por dos motivos: (i) los continuos cortes de gas desde Argentina y (ii) el alza del petróleo que costaba más del doble que cuatro años antes. Ante este escenario, el presidente Lagos propuso medidas paliativas como la estabilización del precio del petróleo, un subsidio para las cuentas de luz y bonos para movilización y combustibles en el hogar.

Sin embargo, la crisis energética era una oportunidad para proponer otras fuentes de generación. Pero el presidente Lagos no estaba pensando precisamente en las energías renovables. “Debo aquí señalar, responsablemente, que si queremos energía segura y limpia para el futuro estamos obligados a pensar en otras fuentes no convencionales de generación de energía, necesitamos repensar los nuevos procesamientos tecnológicos del carbón que no contamina y también necesitamos pensar en la energía nuclear”. También anunció que se llamaría a una licitación internacional para proveer este gas licuado. “La planta regasificadora, en consecuencia, será una realidad y Chile comenzará a tener una mayor autonomía en el ámbito energético”, dijo.

2.9. Bachelet y la alianza energética con Obama (2006–2010; 2014– 2018)

En 2006, en su primer año de mandato, Michelle Bachelet Jeria marcó su postura frente a la política energética. En su primera cuenta pública, la mandataria señaló: “Chile debe utilizar todos los recursos de los que dispone para la generación eléctrica, incluyendo los recursos renovables, entre ellos hidráulicos, eólicos y geotérmicos, por mencionar algunos. El agua, viento y vapor son parte de nuestra riqueza. El país no puede darse el lujo de no usar estos recursos, especialmente a la luz del escenario mundial marcado por restricciones y altos precios”.³⁸

³⁷ Cuenta pública de Ricardo Lagos Escobar, 2004.

³⁸ Cuenta pública de Michelle Bachelet Jeria, 2006.

Con fecha 20 de noviembre de 2007, Bachelet suscribió en Santiago, junto al gobierno alemán, el Convenio sobre Cooperación Financiera 2007 Programa Energías Renovables y Eficiencia Energética. Dicho acuerdo quedó plasmado en el Decreto N° 267/2008 del Ministerio de Relaciones Exteriores, en el que incluyó el Programa de Levantamiento de Información Geotérmica.

En 2009, el ministro de Energía de la época, Marcelo Tokman, también indicó que se realizaría un estudio para ver la posibilidad de incorporar un sistema de climatización en La Moneda en base a geotermia. Tokman explicó que dado que el Gobierno, y especialmente la presidenta Bachelet, se encuentran totalmente comprometidos con la eficiencia energética “quisimos predicar con el ejemplo y tomar un rol protagónico para mostrarle a la ciudadanía y al sector productivo cómo se pueden implementar los adelantos tecnológicos en materia de eficiencia energética”.³⁹ Sin embargo, dicha propuesta nunca se concretó.

El interés de Bachelet en las energías renovables, incluida la geotermia, se mantuvo en los años siguientes. De hecho, el 21 de marzo de 2011, durante su visita oficial al país, el entonces presidente de Estados Unidos, Barack Obama, destacó el liderazgo de Chile en energía geotérmica. Si bien dichas declaraciones sorprendieron a muchos en el sector energético, el gesto del mandatario norteamericano no era tan inesperado en La Moneda. Dos años antes, cuando la presidenta Michelle Bachelet visitó Washington, uno de los temas abordados con Obama fue precisamente la promoción de las energías renovables. Según recuerda el entonces vicesecretario de Estado de Estados Unidos, Daniel Poneman, en esa ocasión, ambos mandatarios hablaron de energía en el Salón Oval de la Casa Blanca y firmaron un memorando de entendimiento para fortalecer la relación entre ambos países en el uso de tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar y geotérmica.⁴⁰

A fines de 2016, durante su segundo mandato, el Ministerio de Energía lanzó una mesa de trabajo para analizar el potencial geotérmico en Chile y proponer cambios regulatorios e incentivos económicos. En esa instancia, fueron invitados autoridades y organizaciones gremiales de la geotermia, tales como la Asociación Chilena de Energía Geotérmica A.G. (ACHE-GEO), el Consejo Geotérmico, entidad gremial creada en 2013 y distinta del Comité Geotérmico de CORFO constituido a fines de los 60, el Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) y la Asociación Chilena de Energías Renovables y Almacenamiento (ACERA).

³⁹ Agencia Chilena de Eficiencia Energética. “Gobierno convertirá a La Moneda en un edificio eficiente y sustentable para el Bicentenario”. Noticias, 22 de julio de 2009. Fuente: <http://old.acee.cl/577/article-58503.html> (última consulta 31 de enero 2022).

⁴⁰ Corvalán, Marcela, Entrevista a La Tercera, Vicesecretario de Energía de Estados Unidos: “Chile ya tiene un estatus preferente para exportaciones de gas natural”, Noticias, 20 de mayo de 2014. Fuente: <https://www.latercera.com/noticia/vicesecretario-de-energia-de-estados-unidos-chile-ya-tiene-un-estatus-preferente-para-exportaciones-de-gas-natural/> (última consulta 31 de enero 2022).

En septiembre de 2017, la presidenta Bachelet fue la encargada de inaugurar Cerro Pabellón, la primera planta de generación geotérmica en Sudamérica y que representa un simbólico hito en las gestiones público-privadas para lograr el desarrollo de esta energía en Chile.

2.10. Piñera y el reimpulso de la geotermia (2010-2014; 2018-2022)

En su primera cuenta pública ante el Congreso Pleno, en 2010, Sebastián Piñera informó de una serie de gestiones tendientes a la promoción de las energías renovables, como la suscripción de un acuerdo bilateral de cooperación con Francia para el fomento de las energías renovables, una negociación con el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) para un crédito denominado Programa de Energías Sostenible, la adhesión a la Red Internacional de Enlaces Energéticos y la firma del Memorándum de Cooperación en el área energética entre Chile y Estados Unidos.⁴¹

En su cuenta de 2011, Piñera sostuvo que la generación de energías renovables, incluyendo expresamente a la geotermia, es una “firme prioridad”. En ese sentido, reafirmó el compromiso de que las renovables alcancen el 20 por ciento de la matriz energética, aunque dijo que “no podemos renunciar a la energía térmica ni hidráulica”.⁴²

Al año siguiente, el mandatario tuvo un mensaje similar, también aludiendo al potencial de la energía geotérmica. En ese contexto, anunció una inversión de 85 mil millones de dólares.⁴³ En 2013, en tanto, anunció la Estrategia Nacional de Energía para las dos décadas siguientes.⁴⁴

Durante su segundo período, Piñera mantuvo un discurso similar, destacando el potencial de Chile en energías renovables. Así, en 2018, anunció la “Ruta Energética 2018-2022” en la que se incluía, por cierto, “las energías térmicas que provienen de nuestros volcanes”.⁴⁵ En 2019 y 2020 hubo referencias breves a las energías renovables.

En el año 2021, en tanto, el mandatario vinculó el desarrollo de las energías renovables con la crisis climática. “Chile y los chilenos tenemos muy claro nuestros compromisos y responsabilidades. Por eso estamos comprometidos con transformar a Chile en un país carbono neutral y cumplir nuestros compromisos con el Acuerdo de París”.⁴⁶ Y agregó: “Para Chile el desafío ambiental constituye un problema y también una oportunidad. Además de nuestro enorme potencial en energías limpias y

⁴¹ Cuenta pública de Sebastián Piñera Echenique, 2010.

⁴² Cuenta pública de Sebastián Piñera Echenique, 2011.

⁴³ Cuenta pública de Sebastián Piñera Echenique, 2012.

⁴⁴ Cuenta pública de Sebastián Piñera Echenique, 2013.

⁴⁵ Cuenta pública de Sebastián Piñera Echenique, 2018.

⁴⁶ Cuenta pública de Sebastián Piñera Echenique, 2021.

renovables, como la energía del sol, el viento, *la tierra* y el mar”⁴⁷ (énfasis agregado), remató, incluyendo una mención a la geotermia.

Sin embargo, probablemente el mayor aporte de Sebastián Piñera fue el diseño y presentación de un proyecto de ley que podría revolucionar el uso de la geotermia en Chile. Se trataba del proyecto de ley enviado al Congreso en 2019 para regular el uso directo de la geotermia, aquella que no se utiliza para generación de electricidad, sino para usos distintos, como calefacción.

3. Voz y voto del Congreso

Esta sección aborda el rol de la Cámara de Diputados y del Senado en la discusión y aprobación del marco regulatorio de la actividad geotérmica. Por cierto, la regulación más importante es la Ley de Concesiones Geotérmicas que se aborda en detalle en la primera parte, con énfasis en la historia de la ley más que en sus disposiciones que ya son ampliamente conocidas. En la segunda parte se abordan los proyectos de ley que nunca han sido aprobados, muchos de ellos aún siguen pendientes después de años de tramitación.

3.1. Antecedentes históricos de la regulación geotérmica

La Ley General de Servicios Eléctricos dictada por el gobierno del presidente Jorge Alessandri, en uso de las facultades delegadas por la Ley N° 13.305, Decreto con Fuerza de Ley 4, de 31 de agosto de 1959, se refería incidentalmente a esta materia en su artículo 1° al señalar que están comprendidas en las disposiciones de dicha ley: “Las Concesiones para establecer, operar y explotar: a) Centrales térmicas productoras de energía eléctrica, entendiéndose por térmicas las que emplean combustibles, *energía geotérmica*, energía solar, energía nuclear o cualquiera otra fuente que no sea el agua” (énfasis agregado).⁴⁸

Dos décadas después, se dictó una nueva Ley General de Servicios Eléctricos, Decreto con Fuerza de Ley 1, del 22 de junio de 1982, promulgada otra vez en virtud de facultades delegadas por la Ley N° 18.091, es decir, no por discusión parlamentaria. Esta legislación dejó fuera de su campo a las centrales térmicas, consagrando al respecto un criterio diametralmente opuesto al Decreto con Fuerza de Ley 4 que sí las incluía expresamente. Por consiguiente, hoy las centrales térmicas productoras de energía eléctrica, incluidas las geotérmicas, no requieren concesión especial del Estado y pueden instalarse libremente. En cambio, las centrales hi-

⁴⁷ *Ibid.*

⁴⁸ La primera Ley de Servicios Eléctricos, aprobada por Decreto con Fuerza de Ley 244, de 30 de mayo de 1931, dictada por el presidente Carlos Ibáñez del Campo, en uso de facultades delegadas por la Ley N° 4945, no contenía una norma similar ni hacía referencia alguna a la energía geotérmica.

dráulicas productoras de energía eléctrica se mantienen sujetas al régimen de concesiones en el referido Decreto con Fuerza de Ley fundado en la Ley N° 18.091, sin perjuicio de que los derechos de aprovechamiento sobre las aguas terrestres que se destinen a la producción de energía eléctrica deban regirse por el Código de Aguas.

Por su parte, el artículo 29 del actual Código de Aguas dispone que el derecho de aprovechamiento de las aguas medicinales y mineromedicinales se adquirirá conforme al Código de Aguas, pero su ejercicio se someterá a las leyes que rijan en la materia. Al respecto el Decreto con Fuerza de Ley 237, de 1931, reglamenta los establecimientos para explotar aguas termales, minerales o no minerales, que produzcan acción medicinal.

3.2. La historia de la Ley de Concesiones

El 6 de diciembre de 1991, el entonces presidente Aylwin envió al Congreso el mensaje presidencial N° 231-323. Se trataba del primer intento sistemático de promulgar una regulación específica para la geotermia, más allá de menciones aisladas en otros cuerpos normativos. El mensaje presidencial partía con un acabado análisis del concepto jurídico de energía geotérmica. Ello no sorprende, dado que el proyecto fue enviado por Aylwin, quien era un reconocido abogado experto en Derecho Administrativo.

El mensaje presidencial también era un acucioso informe legal que analiza las alternativas para implementar un marco legal para la geotermia. Así, el mensaje analiza, una a una, todas las opciones utilizadas en la legislación comparada, como el sistema de propiedad del dueño del terreno superficial, sistema de concesión-derecho real, otorgado por un juez, sistema de concesión meramente administrativa, sistema de contrato de operación, y sistema de concesión-derecho real, otorgado por la autoridad administrativa. Finalmente, fue esta última opción de una concesión administrativa la que prevaleció en el proyecto y la que rige a la geotermia hasta hoy.

El proyecto de ley también llevaba la firma del ministro presidente de la Comisión Nacional de Energía, señor Jaime Tohá González, quien precisó que el Ejecutivo ha estimado indispensable establecer una legislación que regule la exploración, la explotación y el aprovechamiento industrial o comercial de la energía geotérmica. Hizo presente que, a lo largo de nuestro país, particularmente en las Regiones I y II, existen abundantes manifestaciones termales.

Tohá explicó que entre los puntos que se consideraron para elegir el tipo de legislación, se tomó en cuenta que la Constitución solo excluye de las concesiones de exploración y de explotación a los hidrocarburos líquidos o gaseosos, los cuales deben ser explorados o explotados por el Estado, o por medio de concesiones administrativas y por contratos especiales de

operación. Por lo tanto, si se incorporara la energía geotérmica a esta normativa legal, se le estaría dando una importancia análoga a la del petróleo a otra substancia estratégica, lo cual, por lo menos, es discutible. Expresó que, después de analizar todas las posibilidades, se optó por el sistema de concesión-derecho real, otorgado por la autoridad administrativa. Este sistema, como se ha dicho anteriormente, concede un derecho de propiedad sobre el bien al concesionario, lo que lo hace más atractivo, por cuanto queda protegido por la garantía constitucional del derecho de propiedad.⁴⁹

Durante la discusión de la ley en la Comisión de Minería y Energía, el senador RN Miguel Otero intervino para señalar que el proyecto de ley sobre energía geotérmica nació de un informe jurídico, por él redactado, cuando la CORFO quiso licitar El Tatio. En dicho informe, agregó, se dijo que no existía legislación aplicable a la geotermia. Prosiguió diciendo que, en conformidad al informe jurídico, se tuvo que dejar sin efecto la licitación internacional.

Otra de las figuras que intervinieron en la discusión de la ley fue el poeta Armando Uribe, quien también era abogado experto en legislación minera. Uribe fue bastante crítico del proyecto y señaló que éste tenía un “carácter absolutamente administrativo, con un distanciamiento, querido, pero no logrado, respecto de la legislación minera”. Dijo que la “energía geotérmica es voluble, pero dentro de ella, incluso en los vapores, se encuentra en suspensión material minero”. El profesor Uribe agregó que en el proyecto de ley falta coherencia respecto a la estructura de la legislación, no solo la minera, sobre derechos de exploración y explotación de distintos bienes.

Después de diez años de tramitación en el Congreso Nacional, este proyecto se convirtió en la Ley N° 19.657 sobre Concesiones de Energía Geotérmica, publicada el 7 de enero de 2000.

3.3. Los intentos fallidos para regular a la energía geotérmica

En los últimos años, el Ejecutivo ha intentado reformar el actual marco normativo de la geotermia. En ese contexto, se han presentado más de una decena de proyectos de ley con el objetivo de eliminar algunas barreras surgidas a partir de la legislación. Algunas de estas propuestas han sido presentadas vía moción parlamentaria. A continuación, se mencionan algunos de estos proyectos de ley.

El 7 de enero de 2009, a través del mensaje presidencial, el gobierno de Michelle Bachelet ingresó el proyecto de ley para modificar la Ley N° 19.657. Dicha iniciativa destacó entre sus objetivos, “facilitar e incentivar la inversión de recursos en la generación de proyectos de exploración y explotación, agilizando la tramitación de las solicitudes de concesiones

⁴⁹ Historia de la Ley N° 19.657, pp. 22, 23.

de energía geotérmica”, además de “implementar las herramientas que permitan asegurar el efectivo cumplimiento de las obligaciones contraídas por los concesionarios”.⁵⁰

Por su parte, con fecha 29 de julio de 2010, la administración de Sebastián Piñera también envió un nuevo proyecto de ley para modificar la Ley N° 19.657. Entre los objetivos de la iniciativa estaban: 1) agilizar los procedimientos de entrega de concesiones de exploración y de explotación de la geotermia; y 2) asegurar que los concesionarios efectúen los trabajos de exploración y de explotación que correspondan.⁵¹

El 15 de abril de 2009, un grupo de diputados ingresó, vía moción parlamentaria, un proyecto de ley que introduce un tercer inciso al artículo 22 de la Ley N° 19.657. Dicho texto proponía que, en el caso de un proyecto de explotación respecto de un reservorio geotérmico común, se deberá someter el nuevo proyecto al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental establecido por la ley 19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente, aún en el caso que se trate de un proyecto de generación de menos de 3 MW de electricidad. De acuerdo con la moción parlamentaria, la justificación del proyecto radica en que “respecto de la protección del recurso geotérmico, existe a nivel internacional una regulación dada tanto por las reglas de explotación de reservorios geotérmicos comunes”.⁵²

Con fecha 16 de junio de 2011, se presentó una iniciativa similar que plantea cambiar los artículos 10 y 11 de la Ley 19.300, de manera que los proyectos geotérmicos se sometan al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), de manera de enfrentar el vacío legal en materia ambiental.⁵³

Estos proyectos de ley que nunca fueron aprobados dejan en evidencia vacíos legales de la regulación geotérmica, muchos de los cuales persisten hasta ahora. Estas incertidumbres generan barreras en la tramitación y desarrollo de proyectos de energía geotérmica, además de desincentivar la inversión e interés privados. Particularmente, estas iniciativas intentaron agilizar los procesos de tramitación de una concesión, así como establecer obligaciones de evaluación ambiental. Este vacío ha generado algunos conflictos legales, como se indica en la siguiente sección.

3.4. La reforma para masificar la energía geotérmica

Han sido varios los intentos por modificar la Ley N° 19.657 sobre Concesiones Geotérmicas, tal como se revisó en el punto anterior. Sin embargo, la reforma más relevante se tramita actualmente en el Congreso, luego de que el presidente Piñera enviara un proyecto de ley. Esta propues-

⁵⁰ Boletín N° 6379-08.

⁵¹ Boletín N° 7162-08.

⁵² Boletín N° 6465-08.

⁵³ Boletín N° 7730-12.

ta plantea, por primera vez, el uso directo de la energía geotérmica para fines distintos a la electricidad, sin necesidad de tramitar una concesión. De aprobarse, la reforma podría tener un impacto masivo en el uso de esta fuente energética.

Según consta en el historial de la tramitación legislativa, el mensaje presidencial destaca las ventajas del uso directo de la geotermia: “Los aprovechamientos someros de energía geotérmica presentan características distintas que un proyecto eléctrico en sus etapas de construcción y operación, así como magnitudes muy inferiores respecto a la inversión, superficie ocupada, impacto ambiental, área de influencia, exigencias de seguridad, complejidad técnica, entre otros aspectos”.⁵⁴

Asimismo, se pone énfasis en que “mientras la tendencia mundial muestra un aumento significativo en el desarrollo de proyectos de usos directos de la geotermia, Chile está quedando rezagado: Chile ocupa el lugar 54 del mundo en el ranking de capacidad instalada de usos directos de la geotermia, con 20 MW”. El mandatario también destacó en su propuesta los beneficios para la sociedad relacionados al desarrollo de estas tecnologías de generación térmica renovables tales, como “una retribución económica y el aumento de la competitividad de diversos sectores productivos y comerciales, sino que además puede tener impacto a mediano y largo plazo en aquellas ciudades donde actualmente la leña es utilizada como combustible principal para la calefacción de viviendas”.⁵⁵

Esta iniciativa legal establece un régimen especial para el uso directo de la geotermia que consiste en la inscripción en un registro público a cargo del Ministerio de Energía sin necesidad de tramitar una concesión. Esto incentiva sustancialmente la instalación de bombas de calor para distintos usos y, lo más relevante, constituye una forma de “democratizar” el uso de la energía porque cualquier persona puede producir energía geotérmica de manera doméstica.

Este proyecto de ley se encuentra actualmente en la etapa final de tramitación en el Congreso y podría representar un hito importante para la transición energética en Chile, donde la calefacción utiliza principalmente leña y combustibles fósiles, siendo una de las causas importantes de la contaminación en distintas ciudades del país, causando impactos en la salud de las personas y en el medio ambiente.

4. Los litigios geotérmicos

Los jueces hablan a través de sus fallos. Es por ello que para conocer la postura sobre la geotermia que han tenido los tribunales, el tercer poder del Estado, se deben revisar sus sentencias. En esta sección se identifican

⁵⁴ Mensaje presidencial N° 028-367, de fecha 4 de abril de 2019.

⁵⁵ *Ibíd.*

algunos de los litigios más relevantes relacionados con la exploración y/o explotación geotérmica, así como conflictos vinculados al otorgamiento de concesiones, su localización y eventuales impactos sobre el medio ambiente y sobre comunidades locales.

Para la revisión de estas sentencias, se efectuó una selección de jurisprudencia enfocada solo en tribunales superiores, es decir, cortes de apelaciones y la Corte Suprema, dentro de los últimos 15 años. El resultado de esta búsqueda revela un antecedente interesante: existen más de una decena de litigios, de distintas materias, que se refieren a la geotermia. Estas materias tienen que ver con impactos ambientales, afectación de comunidades indígenas y procedimiento de otorgamiento de concesiones. A continuación, se describen algunos ejemplos de litigios geotérmicos.

4.1. Impactos ambientales

Probablemente, El Tatio es uno de los proyectos geotérmicos ejecutados en Chile más conocidos. Esto, debido a que se trata de un sector con alto potencial de este recurso y cuya exploración se ha realizado hace décadas. El proyecto también tuvo una alta cobertura mediática debido a los posibles impactos ambientales en la zona de los géiseres de El Tatio. Por lo mismo, no llama la atención que uno de los primeros litigios geotérmicos se haya presentado en relación a este proyecto.

De acuerdo con la sentencia de la Corte de Apelaciones de Santiago, en septiembre de 2007, un grupo de trabajadores de la empresa Geotérmica del Norte realizó perforaciones en el sector de El Tatio, en la Región de Atacama, para explorar posibles fuentes geotérmicas. Según los recurrentes, entre los que estaba la Asociación Indígena Consejo Atacameño y otras comunidades, se habían instalado tubos que extraían y otros destinados a botar los desechos desde sus baños al drenaje que se ubica a un metro de una vertiente. Además, en el mismo lugar se instaló un generador eléctrico de enormes capacidades provocando ruido y contaminación. A su juicio, la empresa incurría en “actos que son arbitrarios e ilegales, los que implican una perturbación y amenaza para el medio ambiente, ya que al estar realizando trabajos, extrayendo agua y botando o pretendiendo botar los desechos sanitarios cerca de la vertiente de Jauna”. El principal reclamo de las comunidades era que los trabajos se realizaban sin contar con una autorización ambiental, como lo establece la legislación ambiental.⁵⁶ En este caso, la Corte rechazó el recurso, argumentando que la empresa estaba facultada para realizar las perforaciones, en virtud de la Ley de Concesiones Geotérmicas, además de la “vulnerabilidad respecto de la disponibilidad y seguridad energética” que enfrenta el país.⁵⁷

⁵⁶ Rol N° 740-2007, Corte de Apelaciones de Antofagasta, confirmado por la Corte Suprema en Rol N° 167-2008.

⁵⁷ *Ibid.*

Este caso dejó en evidencia un conflicto que persiste hasta hoy: ¿deben las actividades de exploración geotérmica contar con permiso ambiental? La legislación chilena obliga a someterse a evaluación ambiental solo a las centrales generadoras de energía mayores a 3 MW, pero no a las actividades previas como sondajes o exploraciones.⁵⁸ Este sigue siendo un vacío regulatorio, por lo que es de esperarse que haya más conflictos similares.

4.2. Afectación sobre comunidades indígenas

Uno de los temas discutidos por los tribunales ha sido la necesidad o no de realizar una consulta indígena en los procedimientos de autorización de proyectos de inversión sobre recursos naturales que puedan afectar a comunidades, así como tierras o aguas indígenas, ya sea dentro o fuera del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.⁵⁹

Un caso en que se discutió la pertinencia de una consulta indígena fue debido al otorgamiento de la concesión de exploración geotérmica Sollipulli, adjudicada a la empresa Ormat Andina Energía Limitada. En este caso, en abril de 2012, la comunidad indígena Huenchullán, en la Región de la Araucanía, presentó un recurso de protección en contra del Ministerio de Energía por haber dictado el decreto que otorgaba dicha concesión sin haberse realizado la consulta indígena, de conformidad al Convenio N° 169 de la Organización Internacional del Trabajo (OIT). Los reclamantes argumentaron que el ministerio no cumplió con las garantías constitucionales de igualdad ante la ley y el derecho de vivir en un medio ambiente libre de contaminación. Aunque la Corte de Apelaciones de Santiago rechazó el recurso de protección por extemporáneo, también sostuvo que, durante la etapa de concesión de la exploración geotérmica es imposible determinar si se afectarán determinadas comunidades indígenas.⁶⁰ Según este dictamen, la consulta indígena no procede en la etapa de exploración de un proyecto geotérmico, pero sí debe efectuarse durante la “realización”, es decir, en la fase de explotación.⁶¹

Este caso nuevamente revela un conflicto pendiente sobre la oportunidad para realizar la consulta indígena: al momento de otorgarse la concesión, al momento de la etapa de exploración, o al momento de la evaluación ambiental, la que, como se ha señalado, sólo procede para la etapa de explotación. Según Bermúdez y Hervé, resulta curioso que, en este caso, la Corte no haya aplicado lo dispuesto por el artículo 15.2 del

⁵⁸ Miguel Saldívar y Sofa Vargas, “Environmental impact assessment and public participation of geothermal energy projects: The cases of Chile, Costa Rica, Colombia and Mexico”, en: Guimaraes, Lucas Noura (ed.) *The Regulation and Policy of Latin American Energy Transitions*, Elsevier, Amsterdam (2020).

⁵⁹ Jorge Bermúdez y Dominique Hervé, “La jurisprudencia ambiental reciente: tendencia al reconocimiento de principios y garantismo con los pueblos indígenas”, *Anuario de Derecho Público*, UDP, 2017, p. 251.

⁶⁰ Rol N° 9.431-2012, Corte de Apelaciones de Santiago. Este recuso fue confirmado por la Corte Suprema en sentencia Rol N° 9526-2012.

⁶¹ Bermúdez, p. 252.

Convenio 169 que expresamente señala que procede la consulta tanto para la prospección como la explotación de los recursos naturales de titularidad del Estado en tierras indígenas.⁶²

En otro caso similar, también se discutió la superposición de solicitudes de concesión geotérmica con la existencia de comunidades indígenas y sus derechos sobre tierras y aguas ancestrales, sin embargo, la Corte Suprema mantuvo la misma postura, al concluir que “es imposible determinar si se afectarán determinadas comunidades indígenas” durante la tramitación de la concesión geotérmica.⁶³

4.3. Procedimiento de otorgamiento de concesiones

Otro foco de conflictividad judicial es la transparencia y celeridad en los procedimientos de otorgamiento de concesiones geotérmicas. Un caso recurrente en la justicia, por ejemplo, ha sido la solicitud de documentos presentados por los solicitantes o concesionarios ante los servicios públicos.

En 2012, la Sociedad Contractual Minera El Morro presentó un recurso en contra de la Subsecretaría de Energía, por la entrega del informe anual de avance presentado por la concesionaria Infingerge, respecto de la concesión de exploración de energía geotérmica denominada “Manflas”. Este caso fue analizado, primero, por el Consejo para la Transparencia, quien resolvió la entrega parcial de la información, tarjando datos personales existentes en las facturas y boletas. Sin embargo, el caso llegó hasta la Corte de Apelaciones, tribunal que acogió el reclamo de ilegalidad denegando la solicitud de información interpuesta por Sociedad Contractual Minera El Morro, por considerarse información sensible.⁶⁴ Contractual Minera El Morro también solicitó a la Subsecretaría de Energía copias del informe de avance presentado por el concesionario de energía geotérmica Serviland Minergy, lo que también fue denegado en la corte.⁶⁵

En 2017, la Corte de Apelaciones de Santiago también rechazó el reclamo de ilegalidad y confirmó la decisión adoptada por el Consejo para la Transparencia, que ordenó entregar antecedentes solicitados sobre el proyecto de explotación de energía geotérmica, desarrollado en la zona del volcán Tacora, en la Región de Arica y Parinacota. En esta ocasión, en cambio, el tribunal de alzada descartó que la información solicitada al Ministerio de Energía respecto del informe de avances contenga causal de reserva.⁶⁶

⁶² Bermúdez, p. 252.

⁶³ Rol N° 495-2013, Corte Suprema.

⁶⁴ Rol N° 306-2013, Corte de Apelaciones de Santiago.

⁶⁵ Rol N° 308-2013, Corte de Apelaciones de Santiago.

⁶⁶ Rol N° 12.934-2016, Corte de Apelaciones de Santiago.

De acuerdo con la jurisprudencia revisada, las causas de los conflictos que se pueden identificar son principalmente tres: (i) materias relacionadas a impactos ambientales; (ii) afectación de comunidades indígenas, y (iii) asuntos relacionados con el otorgamiento de las concesiones geotérmicas.

5. Hacia una identidad propia de la geotermia

El recorrido histórico del desarrollo de la geotermia confirma que esta fuente de energía ha estado presente en la esfera pública desde hace décadas. Si se considera el informe del Ministerio de Fomento de 1940 como primer antecedente, son 80 años en que distintos actores públicos han abordado la geotermia, con distintos énfasis y enfoques.

A la luz de los antecedentes analizados en este capítulo, es posible revisar las etapas históricas de la geotermia en Chile y proponer la siguiente caracterización: (1) 1908–1923: promoción de la colonia italiana; (2) 1940–1961: etapa de exploración por parte del Estado, (3) 1962–1978: inversión estatal chilena; (4) 2000–presente: inversión privada con el gobierno chileno actuando como regulador.

Adicionalmente, la revisión de documentos e informes de organismos públicos, de discursos oficiales, de leyes y proyectos de leyes, y de sentencias judiciales permite identificar algunos rasgos distintivos que la diferencian de otras fuentes de energía, incluso dentro de las propias renovables. Así, es posible esbozar las siguientes características de la geotermia.

- a. La geotermia tiene características propias distintas a las otras energías renovables, es estable, no depende de las horas del día ni de las estaciones, y se distribuye a lo largo de todo el territorio nacional, es una “energía indígena” disponible para lograr seguridad energética. Es la única energía que tiene “una ley propia” dada la complejidad legal de los procesos de exploración y explotación involucrados en su aprovechamiento.
- b. La geotermia puede ser considerada como una energía más “conflictiva” que otras fuentes, pues han surgido más litigios relacionados con superposición de derechos, problemas con comunidades locales e impactos ambientales. Sin embargo, esta situación se ha debido principalmente a una serie de vacíos legales que generan falta de servidumbres.
- c. La geotermia puede ser una fuente de energía accesible y democrática. Si se considera el régimen de concesiones, la geotermia puede ser percibida como una actividad industrial liderada por grandes empresas concesionarias, la mayoría de ellas extranjeras con una alta capacidad financiera, tal como lo requiere la ley. Sin embargo, la reciente reforma que propone el uso directo de la energía para usos domésticos, como la calefacción, puede cambiar esa

noción a un tipo de energía más democrática y cercana. Esto se alinea con conceptos de democracia energética y justicia energética que se discuten actualmente en el contexto del cambio climático y transición energética.

Estos rasgos distintivos permiten construir una narrativa propia de la geotermia dentro del contexto histórico, incluyendo la discusión acerca de la dependencia energética, el costo de la energía, la seguridad y acceso a las fuentes de generación, así como la creciente preocupación por el cambio climático y los compromisos internacionales adquiridos por Chile en materia ambiental.

Sin embargo, este recorrido histórico también permite reconocer los desafíos pendientes en torno al desarrollo de la geotermia. Estos desafíos dicen relación con el perfeccionamiento del marco regulatorio de manera que se eviten los vacíos legales y los conflictos asociados, de manera de agilizar la tramitación de los proyectos y aprovechar los inagotables recursos de la geotermia en Chile, tal como lo presagiaron los primeros informes décadas atrás.

CAPÍTULO VII

Geotermia y sociedad: reflexiones a partir de intervenciones sociales

Sofía Vargas Payera

1. Introducción

La promoción y el desarrollo de proyectos energéticos implica participación e integración de la ciudadanía. Esta afirmación en 2021 es consenso entre quienes promueven proyectos energéticos, sin embargo, a pesar de contar con marcos normativos, todavía no está totalmente resuelto cómo se integran las inquietudes, necesidades y percepciones de actores sociales y territoriales durante iniciativas energéticas. En este contexto, en este capítulo la invitación es a mirar las iniciativas geotérmicas desde la componente social, es decir, desde la mirada humana y cultural asociada al uso de esta energía.

En la última década, diversos estudios relevan la importancia de las variables sociales para el éxito de un proyecto geotérmico,¹ donde la aceptación de éste va más allá de una relación binaria entre apoyo o rechazo,² y no sólo depende de una compensación económica o la cercanía física a un proyecto, sino más bien se ve influenciada por la percepción que la localidad tiene sobre la vida, desarrollo, actividades, afectaciones y beneficios de éste.³ Esta percepción no es estática, ya que varía de acuerdo con sus fases, y es afectada por las actividades de participación comunitaria ejecutadas por las empresas desarrolladoras.⁴

Históricamente, el estudio de la geotermia ha estado orientado principalmente a comprender el recurso geotérmico desde el punto de vista geológico, mientras que la integración de las ciencias sociales y humanidades ha sido

¹ Adele Manzella, Agnes Allansdottir, Anna Pellizzone (Eds.), *Geothermal energy and society* (Springer International Publishing, 2019); Rolf Wüstenhagen, Maarten Wolsink y Mary Jean Burer, "Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept", *Energy Policy* (2007):2683–2691. Sofía Vargas-Payera, Amanda Martínez-Reyes y Olivier Ejderyan, "Factors and dynamics of the social perception of geothermal energy: Case study of the Tollhuaca exploration project in Chile", *Geothermics* 88 (2020). Anne Maree Dowd, Naomi Boughen, Peta Ashworth and Simone Carr-Cornish, "Geothermal technology in Australia: Investigating social acceptance", *Energy Policy* 39 (2011).

² Rolf Wüstenhagen, Maarten Wolsink y Mary Jean Burer, "Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept", *Energy Policy* (2007):2683–2691.

³ Lygia M Romanach, Simone Carr-Cornish y Grace W. Muriuki, "Societal acceptance of an emerging energy technology: How is geothermal energy portrayed in Australian media?", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42 (2015). Michael Stauffächer, Nora Muggli, Anna Scolobig y Corinne Moser, "Framing deep geothermal energy in mass media: the case of Switzerland", *Technological Forecasting and Social Change*, 98 (2015): 60–70.

⁴ Sofía Vargas-Payera, Amanda Martínez-Reyes y Olivier Ejderyan, "Factors and dynamics of the social perception of geothermal energy: Case study of the Tollhuaca exploration project in Chile", *Geothermics* 88 (2020).

reciente.⁵ En el ámbito de la percepción y aceptación social de la geotermia, algunos estudios destacan una relación de factores donde se conjugan las preferencias e intereses individuales de la comunidad con los factores sociales colectivos, como experiencias con otros proyectos, realidad local y política del territorio.⁶ En ese sentido, este capítulo considera que la percepción social es una variable individual, pero permeada por una mirada colectiva y construida a partir de la historia política y social de los territorios.

Para acercarnos a la relación geotermia y sociedad, revisemos algunos datos de la Encuesta Nacional de Energía,⁷ la que entrega una primera visión respecto al grado de conocimiento y valoración de los distintos tipos de energía para generación de electricidad. Lo primero que podemos destacar es que la energía geotérmica es la menos conocida dentro de las energías renovables: solo un 32% declara conocerla en Chile. Sin embargo, la percepción entre quienes señalaron conocer la tecnología fue positiva, siendo la geotermia respaldada por un 72%. Sobre esta última, el 65% de los encuestados de la zona centro sur (regiones del Maule a la Araucanía) se muestran favorables a la construcción de este tipo de centrales, y en las regiones del sur (desde Los Ríos a Magallanes) alcanza el 82%. Esta misma encuesta indica que existe menor conocimiento o mayor incertidumbre respecto a sus atributos. Así, mientras un 38% señala que se trata de una energía limpia, el 24% la considera sucia y otro 38% no sabe o no responde. Finalmente, y más notoriamente, mientras 27% plantea que se trata de centrales caracterizadas por la continuidad en el suministro de energía eléctrica, 23% la considera discontinua, pero un rotundo 50% no sabe o no responde.

Las cifras que revisamos de la Encuesta Nacional de Energía describen que la ciudadanía en Chile es parte de una tendencia global: la energía geotérmica se conoce poco.⁸ Dentro de sus atributos se desconoce que el calor de la Tierra tiene la ventaja de ser una energía con alto factor de planta, lo quiere decir que no depende de variables climáticas. En otras palabras, la ciudadanía desconoce una de las principales características de la geotermia, ser una energía limpia que está bajo nuestros pies y que puede ser usada para generar electricidad, no importando si es de día o noche, o si está ubicada en el desierto o en zonas con alto nivel de lluvia.

Es importante señalar que lo que se describe en la Encuesta Nacional de Energía es sobre la energía geotérmica para generación de electricidad. Si bien acá nos saldremos del tema central de este capítulo que es cómo la

⁵ Matthias Gross, "Old Science Fiction, New Inspiration: Communicating Unknowns in the Utilization of Geothermal Energy", *Science Communication* 35 (2013):810-819.

⁶ Eefje Cuppen, Olivier Ejderyan, Udo Pesch, Shannon Spruit, Elisabeth van de Grift, Aad Correljé, Behnam Taebi, "When controversies cascade: Analysing the dynamics of public engagement and conflict in the Netherlands and Switzerland through 'controversy spillover'", *Energy Research & Social Science* 68 (2020).

⁷ Ministerio de Energía, "Informe de resultados Encuesta Nacional de Energía", Feedback (2016).

⁸ Raffaele Catali, "Social acceptance: a sine qua non for geothermal development in the 21st century", *Bull. d'Hydrogéologie* 17 (1999):17.

sociedad interactúa con la geotermia, es necesario aclarar este punto. Actualmente no existen estudios en Chile sobre la percepción del uso somero o directo de la energía geotérmica, asociado a climatización de ambientes o de procesos productivos. En los últimos años, se han publicado en Chile informes sobre el mercado de las bombas geotérmicas, sin embargo, existe un vacío en la literatura sobre la componente social, así como también un marco normativo especial para este tipo de uso. La actual ley de geotermia (19.657), publicada en el año 2000, proporciona un marco para la exploración y explotación de esta energía solo para la producción de energía eléctrica. Dicha ley está actualmente en proceso de mejora en la Cámara de Diputados desde abril de 2019 y aún está en trámite para ampliar a otro tipo de usos. Si bien, a octubre de 2021, las mejoras a la ley están en el segundo trámite constitucional para su aprobación, a la fecha, en Chile no existe un marco normativo para el uso somero de la geotermia. Esto se traduce en una gran carencia para la promoción de su uso y desestima la versatilidad del recurso. Esto porque la geotermia puede generar electricidad, pero puede también resolver necesidades térmicas.

Es importante señalar que cuando nos referimos a la producción de electricidad, la inversión y envergadura de los proyectos es mucho mayor que cuando se habla de uso somero. Por ejemplo, si consideramos el proyecto Cerro Pabellón, primera planta geotérmica de Chile, esta cuenta con pozos de alrededor de 2.500 metros de profundidad, mientras que una escuela que se climatiza con bombas de calor geotérmicas requiere de un par de pozos de 30-50 metros. Tanto su alcance, infraestructura y financiamientos son distintos, así como también la percepción social de ambos usos, asuntos que revisaremos más adelante.

Aclarado esos puntos, la invitación es a volver al tema central que es cómo la sociedad interactúa, percibe y se relaciona con la geotermia.

2. Intervenciones sociales

Con la motivación de compartir los aprendizajes obtenidos por el área Geotermia y Sociedad del CEGA, sobre la importancia del involucramiento comunitario e integración de la mirada social y comunitaria en proyectos energéticos, este capítulo describe en la siguiente sección una selección de intervenciones sociales realizadas entre 2016 y 2020, las cuales fueron el principal insumo de análisis para entregar, en la segunda parte del capítulo, un listado de aprendizajes y reflexiones sobre la relación entre la geotermia, sus usos y la sociedad.

2.1. Integración del componente social en proyectos de uso directo o somero de geotermia

Desde 2016, los proyectos de geotermia somera impulsados por CEGA integraron la componente social. Esto, buscando expandir la mi-

rada y exponer, desde el comienzo de los proyectos con bombas de calor geotérmicas, que la innovación no es solo tecnológica, sino que incluye una componente humana y cultural. Esta variable apuntó a generar apropiación tecnológica, lo que quiere decir, acercar la tecnología promoviendo una familiaridad y continuidad en su uso. De esta forma, se integró la variable social en los proyectos de climatización realizados en la Región de Aysén, particularmente en la iniciativa que permitió calefaccionar un invernadero en el Centro de Educación y Trabajo Valle Verde, en Puerto Aysén, y el Liceo Altos del Mackay, en Coyhaique. Estos fueron los dos primeros proyectos desarrollados por CEGA con bombas de calor, los que se han replicado en otras regiones, como en Los Ríos y la Araucanía.

Figura 1. Mural realizado en Liceo Altos del Mackay, Aysén, como parte de las actividades sociales del proyecto que cambió la climatización de leña a bombas de calor geotérmica en el establecimiento. Archivo CEGA



Dentro de los objetivos propuestos por el área social en estos proyectos se destacó: a) integrar a la comunidad, incorporando sus inquietudes y necesidades en el diseño del proyecto, b) promover herramientas para hacer suyos los saberes técnicos y disminuir así la resistencia al cambio tecnológico, y c) incentivar la utilización del sistema geotérmico después del término del financiamiento. Dentro de las herramientas utilizadas se consideraron los diagnósticos sociales, iniciativas de ciencia ciudadana, creación de murales (siguiendo una iniciativa impulsada por el Área de Comunicaciones del CEGA, revisar capítulo V), talleres y levantamiento de necesidades energéticas locales.

2.2. Talleres con representantes de pueblos indígenas: Asistencia técnica para el desarrollo geotérmico sostenible - Banco Mundial

Entre 2017 y 2019, el CEGA y el Ministerio de Energía dictaron talleres sobre geotermia a representantes de pueblos indígenas, con el fin de disminuir asimetrías de información y fortalecer capacidades para un mejoramiento de estándares de participación.

Los talleres fueron parte del “Convenio Específico de Colaboración para el Desarrollo de Iniciativas de Formación en Geotermia para Comunidades y Líderes Indígenas entre el Ministerio de Energía y CEGA”, se realizaron en varias regiones de Chile y fueron dictados por profesionales del Ministerio de Energía, a través de su oficina de Participación y Diálogo, siendo su orador José Quidel, y los investigadores CEGA, Diego Morata, Diego Aravena y Mauricio Muñoz.



Figura 2. Taller dictado por CEGA y Ministerio de Energía con el objetivo de disminuir asimetrías de información sobre geotermia. Archivo CEGA.

La metodología de los talleres fue diseñada por el área Geotermia y Sociedad del CEGA junto a José Quidel, buscando potenciar los conocimientos de líderes y representantes de los pueblos indígenas en materias relacionadas con las características y diferentes usos que se le pueden dar a la energía geotérmica. Con ellos se buscó el fortalecimiento de capacidades para avanzar hacia la implementación y ejercicio de adecuados estándares de participación indígena en el marco de proyectos de energía geotérmica.

Disminuir asimetrías de información fue una de las principales motivaciones de estos talleres. Esto es clave en el contexto de participación social en el marco de las concesiones geotérmicas. La ley de geotermia, enfocada en el aprovechamiento eléctrico, se basa en que el recurso es de propiedad del Estado, posibilitando a un particular explotarlo mediante una concesión. Desde la entrada en vigor del sistema concesional en el año 2000, numerosas comunidades indígenas han solicitado, vía procedimiento administrativo o judicial, la implementación del deber de de una consulta,

amparados en el Convenio N° 169 de la OIT. En este marco, resulta clave disminuir asimetrías de información antes de enfrentarse a una consulta indígena.

En estos talleres participaron 220 dirigentes y dirigentes, representantes de los pueblos Diaguita, Colla, Quechua, Aymara y Mapuche.

2.3. Jornadas de diálogos territoriales

En paralelo a los talleres con líderes indígenas, entre 2016 y 2020, el área Geotermia y Sociedad organizó diversos encuentros con el objetivo de sensibilizar sobre la energía geotérmica, así como generar espacios de diálogo sobre las oportunidades de esta energía en diversos territorios. En ese marco, se organizó el encuentro “Volcán, energía y comunidad”, realizado en Villarrica, Región de la Araucanía, en 2016. Se seleccionó este lugar, porque para entonces había varias concesiones geotérmicas activas y el escenario social y energético de esa región ha estado marcado por la tensión entre reivindicaciones sociales y territoriales, por lo que era relevante contar con un espacio de discusión sobre energía geotérmica.

Además, en junio de 2018, gracias al proyecto FIC ejecutado por CEGA en la Región de Aysén, se realizó el taller “Geotermia: Alternativa energética para la Patagonia”, jornada realizada en la biblioteca municipal, y que contó con la participación de cerca de 30 asistentes. Este espacio permitió conocer la visión de representantes de distintos sectores de la Región de Aysén, así como reconocer las oportunidades de la geotermia en este territorio.

Por último, destaco el taller territorial realizado en Lonquimay, zona cordillerana con un alto nivel de aislamiento geográfico y altas necesidades térmicas, debido a la adversidad climática. También en su biblioteca municipal, la reunión con dirigentes y actores locales sirvió para comprender y escuchar sus preguntas e inquietudes.

Además de estas instancias, el equipo de CEGA realizó diversos levantamientos territoriales en zonas de alto potencial geotérmico para comprender las realidades locales desde una mirada cultural y social, entre ellos, terrenos y acompañamientos antropológicos, además de entrevistas en profundidad a diversos integrantes de comunidades en Lonquimay y El Tatio.



Figura 3. Taller “Volcán, Energía y Comunidad” realizado en 2016 en Villarrica. Archivo CEGA.

2.4. Talleres y análisis de dibujos: comprendiendo la percepción social de niños y niñas

El Área Geotermia y Sociedad del CEGA buscó explorar la visión y comprensión de la geotermia a temprana edad. Para ello, entre 2017 y 2019, se realizaron talleres con niñas y niños dictados por un equipo conformado por Diego Aravena, Carolina Geoffroy y Camila Pineda. En estas instancias, se utilizó la metodología de análisis de dibujos para comprender, de una forma directa y sencilla, su percepción sobre estas temáticas.

La motivación fue comprender el imaginario cultural de niños y niñas asociados al subsuelo. Esto entendiéndolo que un primer acercamiento a las materias relacionadas con geociencia y geotermia se realiza a través de los espacios formales de aprendizaje, el sistema escolar. Partimos de la base también que estos contenidos requieren esfuerzos extras para favorecer su entendimiento debido a su complejidad y abstracción, a lo que se suma el alto número de contenidos que son entregados en las rutinas escolares. ¿Cuánto conocen los niños y niñas sobre geotermia? ¿Qué elementos conforman su imaginario geotermal? Con estas preguntas como guía, realizamos talleres de geología y geotermia en establecimientos educacionales de las regiones Metropolitana, Aysén y Araucanía.

Parte de este trabajo permitió la publicación del libro “Chile: ¿Qué hay bajo nuestros pies? 16 conceptos geológicos para niñas y niños” publicado en 2020 por CEGA gracias a un Fondo Nacional del Fomento del Libro y la Lectura, convocatoria 2019. Esta experiencia sirvió también de base para un segundo proyecto en el área de educación y percepción de la

geotermia, los recursos y el agua subterránea. Siguiendo una metodología participativa se publicó en 2021 el libro “Agua: una travesía (in) finita”, el cual buscó generar diálogo sobre el agua subterránea, la escasez hídrica y la gobernanza del agua. Este proyecto integró la visión de niños y niñas, actores sociales e investigadoras/es del agua y fue financiado por el Fondo Ciencia Pública.



Figura 4. Realización de talleres con niños y niñas en 2018 en Villarrica. Archivo CEGA.

3. Reflexiones

En esta sección se destacan los aprendizajes y reflexiones, enfatizando los principales aspectos asociados a la percepción social de la geotermia, preocupaciones territoriales y desafíos, obtenidas a partir de los cinco años de ejecución de proyectos del área Geotermia y Sociedad de CEGA descritos en la sección anterior. Dentro de las metodologías utilizadas para su registro y análisis se consideraron el análisis temático de actas, acompañamiento etnográfico y entrevistas abiertas en profundidad. Las iniciativas de uso somero de geotermia fueron registradas y sistematizadas, de esta forma, se dio un espacio para el análisis de experiencias y para avanzar en herramientas y estrategias en torno a la geotermia, pues si bien este tipo de proyectos tiene similitudes con otros de innovación tecnológica, las bombas de calor, la geotermia y promover cambios culturales asociados a la climatización tienen sus particularidades.

3.1. Manejo y acceso a información y participación en proyectos

Por vivir en tierra de volcanes, como lo es Chile, existe una relación cultural y natural con las expresiones geotermiales del territorio, como volcanes, géiseres y termas. En ese sentido, al ser consultados por el desarrollo geotérmico, participantes, tanto de los talleres como de los encuentros realizados por CEGA, señalan conocer la geotermia porque se tiene relación con termas y volcanes, pero a su vez destacan desconocer cómo se utiliza ese calor para generar electricidad o climatizar ambientes. En este sentido, existe consenso entre los actores sobre la necesidad de contar con más información sobre esta temática. Una autoridad local de la Región de la Araucanía señala: *“Si entre las unidades de energías de Seremias y municipalidades se conoce poco o nada la geotermia, qué se puede pedir de la ciudadanía en general. Falta conocer y tener más información sobre proyectos piloto”*.

A partir de los proyectos demostrativos que ha desarrollado CEGA, hemos observado cómo estas iniciativas piloto pueden ir cambiando el escenario de desconocimiento sobre geotermia. En particular, la Región de Aysén fue aumentado su masa crítica de profesionales y líderes territoriales con alto manejo de información sobre geotermia durante los últimos seis años. Esto surgió a partir de las distintas iniciativas financiadas por el Gobierno Regional, como el estudio de potencial geotérmico de la región, o los proyectos con bombas de calor geotérmico que permitieron climatizar un invernadero en Puerto Cisnes y un liceo en Coyhaique (para profundizar más sobre este caso revisar el capítulo VIII). Este proceso no es necesariamente rápido y no se resuelve con solo una actividad. Acercar la tecnología y la comprensión sobre el recurso es un proceso que puede tardar años, pero que, si se cuenta con instituciones aliadas y ejemplos concretos en el territorio, se puede ir generando apropiación y un mayor manejo de información sobre cómo la geotermia puede ser una aliada para disminuir la pobreza energética de algunas localidades.

Otro tema relevante, comúnmente señalado y que impacta en la percepción de la geotermia, es la participación en proyectos energéticos. Esto fue destacado principalmente por dirigentes indígenas de las regiones de Arica y Parinacota y de Tarapacá, quienes expresaron mayores observaciones y mayor desconfianza sobre susceptibilidad de afectación por parte de la geotermia de uso eléctrico. ¿Por qué esto se percibe más en la zona norte de Chile? En parte, porque existe una mayor presencia y actividad de proyectos de exploración y explotación de energía geotérmica en esa zona. Además, es importante señalar que, de acuerdo con los marcos normativos actuales, la participación ciudadana solo se produce en el contexto de una concesión de explotación geotérmica, lo que quiere decir que hay un recorrido previo que hacen las empresas, antes de establecer el primer encuentro con las comunidades, ya que cuando se entrega una concesión geotérmica existe una fase de exploración, que busca, en una primera instancia, identificar la existencia de un recurso disponible.

Dicha fase de exploración puede terminar en una desestimación del recurso y los proyectos jamás se ejecutan. Esto comúnmente ha ocurrido en el país, es decir, una concesión geotérmica de exploración no asegura su explotación, lo que se ve claramente al mirar las cifras. En 2016, las concesiones geotérmicas eran cerca de 76, de las cuales, a la fecha, solo una terminó en un proyecto: la planta Cerro Pabellón. En este sentido, la evaluación ambiental y la participación ciudadana ocurre en la segunda fase, una vez que ya existe mayor información sobre el recurso energético.

Por otra parte, cuando se trata de comunidades indígenas, las relaciones y su participación en proyectos energéticos se desarrolla en un contexto marcado por el discurso internacional de sus derechos. En las últimas décadas, los desarrollos importantes en el derecho internacional han definido el panorama normativo y legal en el que operan los regímenes de relacionamiento entre Estado y derechos indígenas. En ese marco, un hito en la legislación nacional fue la ratificación del Convenio N° 169 sobre Pueblos Indígenas y Tribales de la OIT, en septiembre de 2008. El objetivo de dicho convenio es superar las prácticas discriminatorias que afectan a estos pueblos y hacer posible que participen en la adopción de decisiones que afectan a sus vidas. Por lo tanto, los principios fundamentales de consulta y participación constituyen la piedra angular del Convenio 169.

Desde la entrada en vigor del sistema concesional geotérmico, numerosas comunidades indígenas han solicitado, vía procedimiento administrativo o judicial, la implementación del deber de consulta del Convenio N° 169 de la OIT. A 2021, el Ministerio de Energía ha implementado cinco consultas indígenas en Chile. En su mayoría han sido en la zona norte del país. La consulta Piuquenes 1 y Piuquenes 2 (2016), cuya área de concesión estaba ubicada en la comuna de San Pedro de Atacama, en la provincia del Loa, Región de Antofagasta. La consulta Volcán Tacora (2016), en la comuna General Lagos, provincia de Parinacota, Región de Arica y Parinacota. La consulta Puchuldiza Sur 2, (2015) solicitada en la comuna de Colchane, provincia del Tamarugal, Región de Atacama. La consulta previa Licancura 1, Licancura 3 y Polliquere II, ubicada en el Valle de Azapa de Arica, y por último, la consulta Pampa Lirima 1, 2 y 3, en la comuna de Pica.

En el marco de las consultas, los acuerdos a los que se puede llegar van en la línea del alcance territorial del proyecto energético; acuerdo para reducción del área de concesión, resguardo de las aguas (seguimiento de la calidad y cantidad de aguas de uso de la comunidad), acuerdo para excluir áreas de alto valor patrimonial/cultural, áreas de alto valor de biodiversidad, acuerdo para excluir áreas de atractivo turístico, productivas, entre otras.

En este sentido, contar con una ley de geotermia que de garantías sociales y ambientales fue una observación reiterada por dirigentes y dirigentes durante los encuentros realizados por CEGA

3.2. La memoria de un incidente, afectación de la percepción a partir del evento de El Tatio

Un hecho que tuvo un alto interés mediático, y que podría considerarse con un hito comunicacional en cuanto a la aparición de la geotermia en el discurso público,⁹ fue el incidente de El Tatio, el cual fue mencionado por participantes de los talleres como un hito en cuanto a los riesgos que se podrían asociar a la geotermia. Este incidente ocurrió en 2009 en el marco de una exploración geotérmica desarrollada por la empresa Geotérmica del Norte (GND). En la zona, que se caracteriza por un alto valor cultural y turístico por contar con el 10% de los géiseres del mundo, se generó una fumarola de cerca de 60 metros que se extendió por 27 días. Esto despertó la preocupación local y nacional por el impacto que podría tener en los géiseres vecinos y en la flora y fauna del lugar.



Figura 5 y 6. Prensa nacional sobre evento de El Tatio, 2009. Archivo CEGA.

De acuerdo con las entrevistas realizadas en la provincia de El Loa, la geotermia es una energía conocida en los poblados de Toconce y Caspana, y entre sus habitantes se vincula principalmente a la generación de electricidad. Incluso, en ambos pueblos aún se pueden encontrar los testimonios de personas que trabajaron en la década del 70 en la serie de estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos desarrollados por CORFO y las Naciones Unidas, que culminaron en la perforación de pozos exploratorios en la zona de El Tatio.

⁹ Sofia Otero, "Fighting the information gap and the steam monster, the Chilean experience on geothermal outreach", *Proceedings World Geothermal Congress* (2015). Sofia Vargas-Payera, "Understanding social acceptance of geothermal energy: Case study for Araucanía region, Chile", *Geothermics* 72 (2018):138-144.

“En el 1966 se dio un estudio de CORFO con las Naciones Unidas. Se perforaron 13 pozos, me parece, y hubo tres o cuatro que dieron un excelente resultado. En ese tiempo hubo como entre 10 ó 15 personas que trabajaron de aquí en eso del Tatio, pero tampoco sabemos qué habrá pasado con eso” (Habitante de Caspana).

En el 2007, el proyecto “Perforación Geotérmica Profunda El Tatio, Fase I” presentado por la empresa Geotérmica del Norte, generó una división al interior de los poblados del Alto El Loa. Para algunos planteó la esperanza de mayores oportunidades laborales, terminando así con el éxodo de personas jóvenes. Además, se vio como una vía para contar con electricidad las 24 horas del día.

“Eran los sueños que teníamos acá todos. Que se iba a instalar la planta acá y que nosotros nos íbamos a ver favorecidos. Entonces la empresa aquí hizo sus trabajos, estudios, terminó y se quedó ahí. Y yo no sé si eso va a continuar o qué es lo que pasa. Por eso la juventud se fue a Calama, se fueron a trabajar a otra parte. Con la geotermia en El Tatio, toda la juventud se iba a trabajar allá. Esa era la idea, ahí nosotros fracasamos. Y no sé por qué, hay poco conocimiento de esa parte”. (Entrevistado en Caspana).

“Según los expertos que vinieron no iba a dañar los géisers, nos mostraron un video y todo. Ese era el temor que algunas personas tenían, que si la empresa empezaba a funcionar los géisers de El Tatio se iban a apagar, las fumarolas, las aguas termales”. (Entrevistado en Caspana).

No obstante, a pesar del apoyo de algunos integrantes de la comunidad de Toconce y Caspana, de manera paralela, parte importante de las comunidades del Alto El Loa manifestaron públicamente su rechazo al proyecto, por considerarlo una “violación de terrenos sagrados”. Se conforma así la Mesa de Defensa de El Tatio que declaraba en 2008 su total rechazo al proyecto encabezado por la empresa Geotérmica del Norte.

Este evento, que ocurrió hace cerca de diez años, quedó en la memoria de varios dirigentes. El Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) analizó el caso para evaluar su impacto ambiental y las causas del incidente, y en el informe “Revisión de la Ejecución del Proyecto Perforación Geotérmica Profunda El Tatio Fase I”, publicado en octubre de 2010, dio cuenta de que “a pesar de su gran experiencia a nivel mundial, GDN cometió serios errores en cuanto a la seguridad en las pruebas de pozos en El Tatio”. Esto se refiere, principalmente, a procedimientos técnicos en la fase de reinyección. Por otra parte, el informe concluye que no existió afectación en el reservorio geotermal y tampoco en la vegetación o en sitios arqueológicos de la zona. Esta información fue poco difundida en los medios locales y nacionales.

3.3. La tierra y sus elementos: el volcán

Dentro de los factores del entorno, la figura del volcán es un elemento cultural clave en el territorio nacional. Si bien la energía geotérmica no necesariamente se puede utilizar en zonas con volcanismo activo, lo más común es que así sea. De hecho, las concesiones geotérmicas en Chile en su mayoría se encuentran en zonas con volcanes activos. De esta forma, por un lado, existe una parte valórica de la tierra y el mundo espiritual asociado y, por otro lado, un temor por lo impredecible que es un volcán. Esta visión *volcanizadora* de la geotermia se presenta, donde el temor por el volcán está dentro de los factores que podrían afectar la percepción social de este elemento.

Por otra parte, miembros del pueblo Mapuche de la comuna de Lonquimay, en entrevistas en profundidad realizadas en 2017, nos hablaron sobre la fuerte relación entre la comunidad local y los volcanes. La nación mapuche tiene una fuerte relación con los volcanes y los considera como espacios y seres espirituales. Según su conocimiento tradicional, los humanos no deberían perturbarlos, por lo tanto, el hecho de que los proyectos de energía geotérmica puedan alterar el entorno natural crea una percepción negativa entre algunos miembros de la comunidad mapuche hacia este tipo de desarrollos. *“Vemos al volcán como energía, pero como energía espiritual, no como un recurso para satisfacer necesidades... El volcán está vivo”*, señaló un dirigente de La Araucanía. Este respeto por los volcanes se entiende como una relación profunda y, por lo mismo, según señaló una dirigente, no se trata de no intervenir, se trata de generar un espacio de respeto y valoración. *“No nos cerramos a la idea de hacer proyectos, pero es distinto cuando se respetan nuestras creencias”*, señaló una dirigente de Mellipeco.

En este sentido, Skewes y Guerra¹⁰ relevan la relación que los pueblos indígenas tienen con elementos del paisaje, basado en una comprensión holista del paisaje. Se contraponen a la visión utilitarista que existe en torno a la naturaleza, lo que implica en buena parte la resistencia a proyectos que intervienen dicho paisaje o entorno natural, pues implica una afectación sobre su historia, su identidad y su patrimonio.

En este contexto, el desafío para el mundo público y privado es cómo promover la geotermia, energía que permitiría sacar las fuentes contaminantes de la matriz energética, respetando las tradiciones culturales de los territorios.

3.4. Imaginarios sobre el subsuelo: percepción de niñas y niños

El volcán es una figura importante en el imaginario cultural, como hemos revisado en la sección anterior, sobre todo considerando que Chile

¹⁰ Juan Carlos Skewes y Debbie Guerra, “Sobre árboles, volcanes y lagos: algunos giros ontológicos para comprender la geografía mapuche cordillerana del sur de Chile”, *Intersecciones en Antropología* 18 (1) (2016):63-76.

cuenta con más de 90 volcanes despiertos. Por lo mismo, en los talleres que realizamos con niños y niñas buscamos entender su percepción. En las actividades pedagógicas que realizamos en las regiones Metropolitana, de la Araucanía y de Aysén constatamos que la mayoría de los y las estudiantes no conocen cómo funcionan los sistemas geotermales y cómo esta energía se puede utilizar para generar electricidad. Por otra parte, pudimos comprender que existe un bajo conocimiento en general sobre el subsuelo, pues los y las estudiantes lo dibujaron de una forma homogénea, algo más parecido a un trozo de cemento, siendo en realidad visualmente más similar a una torta de bizcocho.

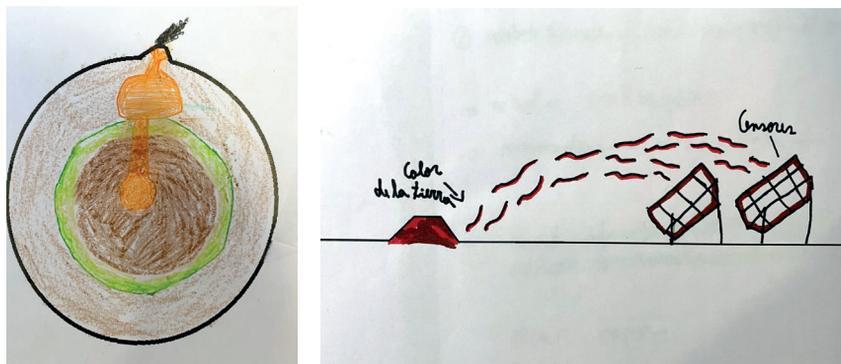


Figura 7 y 8. Dibujos realizados por niños y niñas. Muestran como es el interior de la Tierra y cómo creen se puede utilizar la geotermia para generar electricidad. Archivo CEGA.

Si bien observamos que niños y niñas manejan información sobre que la Tierra está conformada por capas, en la mayoría de los casos eran parecidos a cebollas, no con identificación clara de corteza, manto y núcleo. En algunos casos se incluyeron especies de lagos o ríos subterráneos, refiriéndose al agua subterránea. Por otra parte, se asociaron las erupciones volcánicas al uso de geotermia para generar electricidad y los volcanes activos al núcleo de la Tierra. Estas interpretaciones nos invitan a reflexionar sobre la información a la que acceden los y las estudiantes, y nos invitan a ser persistentes con la idea de la importancia de promover espacios educativos sobre geotermia desde una edad temprana y dentro del currículum escolar.

Al ser consultados sobre el uso directo o con bombas de calor geotérmicas, los niños y niñas mostraron una confusión en el alcance de los proyectos, pues sus dibujos tuvieron relación con sistemas interconectados con el magma de la Tierra. Acá es clave diferenciar que los sistemas con bombas de calor utilizan la estabilidad del suelo que está en los primeros metros de la tierra, su uso, cuando se trata de sistemas verticales, conllevan perforaciones de cerca de 20-40 metros, algo muy alejado a tocar sistemas magmáticos o el núcleo de la Tierra. Al igual que el punto anterior, este entendimiento promueve y confirma la necesidad de contar con material

didáctico para este público y un llamado a la integración en el currículum escolar, esto porque, por ejemplo, el uso somero o directo de la geotermia no es, a la fecha, parte de textos escolares en Chile.

3.5. ¿Cómo comunicar y qué?

Dentro de los principales aprendizajes que obtuvimos al realizar los talleres con líderes de pueblos indígenas, está la importancia de comunicar los riesgos de la exploración geotérmica y los tiempos de ejecución de los proyectos. Si bien la energía geotérmica es una energía limpia que cuenta con varias ventajas, como funcionar 24 horas y sin depender del clima, se tiende a comunicar sólo dichas ventajas y olvidar señalar los riesgos e impactos.

En este sentido, las principales preguntas fueron: si la geotermia es tan buena, ¿por qué no se desarrolla más en Chile como la energía solar? ¿Qué pasa con los pozos de exploración cuando no se realizan los proyectos? ¿Qué ocurre con los derechos de agua?

Abordar este tipo de preguntas es clave para generar confianza entre actores locales sobre el uso de la geotermia, así como también generar espacios de conversación en torno a los tiempos de los proyectos. Este último punto es fundamental, porque hay una gran diferencia entre los plazos y tiempos de los proyectos geotérmicos en comparación con el resto de las energías renovables, como la solar, por ejemplo. En el caso de la geotermia el recurso se encuentra en el subsuelo, no se ve necesariamente y requiere de una fase de exploración, la que se asocia a investigación superficial o construcción de pozos exploratorios que pueden tardar entre dos y seis años. Luego de esto viene la fase de explotación del recurso, lo que puede tardar otros cuatro años.

Por otra parte, otro de los grandes aprendizajes que tuvimos durante 2018 y 2019, años de ejecución de los talleres, fue cambiar nuestro lenguaje como investigadores. Si bien todas nuestras actividades partieron de una base democratizadora y con un afán de diálogo, en el andar de los encuentros territoriales fuimos adaptando nuestro lenguaje. En un taller con dirigentes de pueblos indígenas en Temuco, en la primera sección se señaló que en Chile existe volcanismo activo y que en el cordón montañoso hay al menos 90 volcanes activos, y cientos inactivos. Ante esta explicación, una dirigente pide la palabra y dice: *“No estoy de acuerdo. Para nosotros los volcanes, independiente si tienen actividad, están vivos y si no han tenido una erupción es porque están dormidos, no porque están inactivos”*. Fue así como fuimos adaptando nuestras palabras e incorporando el conocimiento local en nuestro quehacer, además de hacer esfuerzos especiales para exponer los plazos de los proyectos y las afectaciones pues, si bien son bajas y la geotermia es una energía limpia y renovable, cualquier tipo de intervención en el territorio implica un impacto.

3.6. Una historia de dos mundos: la generación de electricidad y la geotermia somera

A partir de las distintas interacciones sociales que realizamos desde CEGA, constatamos que la percepción sobre la energía geotérmica varía dependiendo del tipo de uso, si es para generación de electricidad o se trata de un uso somero asociado a climatización, por ejemplo.

En el caso de la producción de electricidad se destacó que las principales preocupaciones estaban asociadas al impacto en el paisaje producto de las líneas de transmisión, afectación en el medio ambiente y una percepción no favorable a los planes de comunicación de las empresas energéticas, más allá de las geotérmicas, siendo consideradas verticales y poco fluidas. Además, destaca la falta de beneficios locales y la ausencia de canales de comunicación efectivos en la etapa de exploración.¹¹ Por otra parte, se señaló interés en conocer el impacto que pueden producir las perforaciones, y el alcance y profundidad de éstas. En este sentido, en diversos talleres los participantes nos consultaron sobre la experiencia de la planta geotérmica de Cerro Pabellón, su actual sistema de monitoreo y su relación con las comunidades.

Esta percepción social sobre geotermia para generación de electricidad cambia cuando se trata de un proyecto con bombas de calor geotérmico o uso directo con agua termal. Esto porque los beneficios de este tipo de proyectos son locales, contrarrestando así una situación que se percibe en el mundo de la producción de energía: producir electricidad pero que, al conectarse al sistema central, beneficia a otras regiones y no necesariamente a la localidad que vive aledaña a una planta de generación. Además, el alcance de los proyectos es otro de los puntos que favorecen la percepción social de la geotermia de uso directo. Esto porque la intervención es muy baja en comparación con la generación de electricidad. Los pozos, por ejemplo, cuando se trata de sistemas verticales, son similares a los pozos de agua, intervenciones conocidas en los territorios.

La diferencia de percepción social entre la generación de electricidad y los usos térmicos la observamos claramente en los talleres con líderes de pueblos indígenas. En estas instancias vimos que la generación de electricidad por sí misma despierta desconfianza, debido a diversas experiencias con proyectos energéticos y las problemáticas socioambientales que van más allá de la geotermia, y que se sustentan en la histórica relación que ha tenido el Estado de Chile con los pueblos indígenas y sus territorios. Por otra parte, los usos directos como climatizar ambientes o invernaderos se presentan como una oportunidad para contrarrestar las necesidades energéticas locales. Dentro de las ideas propuestas, y que se repitieron en

¹¹ Sofia Vargas-Payera, "Understanding social acceptance of geothermal energy: Case study for Araucanía region, Chile", *Geothermics* 72 (2018):138-144. Sofia Vargas-Payera, Amanda Martínez-Reyes y Olivier Ejderyan, "Factors and dynamics of the social perception of geothermal energy: Case study of the Tolhuaca exploration project in Chile", *Geothermics* 88 (2020).

los distintos territorios, asociadas al uso somero de la geotermia fueron: calefacción de escuelas e invernaderos, calefacción de viviendas e incorporación de especialidad en energías renovables en liceos y centros educacionales técnicos de las distintas regiones.

En cuanto a las preocupaciones ambientales, constatamos que varían dependiendo del territorio. Por una parte, dentro de las principales preocupaciones en la zona norte de país, está el recurso hídrico. La escasez hídrica y la preocupación por este valioso elemento y su potencial afectación. Se hicieron especiales críticas a lo señalado en el Art. 27 de la actual Ley de concesiones geotérmicas (para profundizar más sobre esta temática leer capítulo VI) que otorgan propiedad al concesionario respecto de las aguas alumbradas en el proceso de perforación. En este marco, se debe tener presente la existencia de derechos de aguas inscritos a favor de algunas comunidades y, conforme a la legislación nacional indígena, tienen una protección especial por uso ancestral. En este sentido, un dirigente de la zona norte de Chile señala *“Cuando no existe confianza en que el Estado va a asegurar que el agua no se verá afectada, es difícil confiar en las empresas”*.

Por otra parte, en la zona sur, la preocupación cambia, siendo la afectación del paisaje una de las principales inquietudes. Esto se sostiene sobre la inquietud por las zonas protegidas, bosques y el entorno natural en general, debido en parte a la relación cultural con el territorio, sobre todo de integrantes de pueblos indígenas, y a que la principal actividad económica es el turismo, por lo que existe una alta preocupación por zonas donde se realiza senderismo, por ejemplo. Otra de las preocupaciones, por parte de comunidades que viven en zonas con alto número de centros termales, es la utilización y potencial afectación del agua subterránea y su destinación



Figura 9. Mapeo comunitario sobre necesidades energéticas realizado en Lonquimay, 2017. Archivo CEGA.

posterior al ejercicio geotérmico. “Es común cerrar la puerta a los científicos o a la industria porque tenemos miedo de perder el agua caliente”, indicó un administrador de un centro termal de Villarrica. En este sentido, al igual que en el punto anterior, es clave generar espacios de diálogo y comunicación sobre la geotermia para disminuir asimetrías de información y dar respuesta a esos cuestionamientos de una forma temprana.

Dentro de las consultas realizadas sobre ambos tipos de proyectos hubo mucho énfasis en los tipos de permisos requeridos para utilizar la geotermia con bombas de calor, y para utilizar de forma directa el agua termal en parques y/o reservas naturales donde residen los dirigentes, pero no poseen la propiedad directa de la tierra.

3.7. Acompañamiento y apropiación: la importancia de incorporar la mirada social

La experiencia de CEGA en proyectos de geotermia somera ha estado marcada por la climatización con bombas de calor, tanto para ambientes como escuelas y espacios para procesos productivos, como invernaderos. En este sentido, el recambio de un sistema de calefacción junto con implicar un cambio tecnológico exige también cambios culturales.¹² Somos las personas, con distintas experiencias de vida e imaginarios culturales, quienes nos relacionamos con el nuevo sistema de climatización o con la tecnología, por ello, se requiere incorporar distintas actividades para hacer de los sistemas “nuevos”, sistemas amigables y cercanos.

Uno de los principales énfasis del trabajo comunitario de CEGA fue disminuir la resistencia a los cambios. La experiencia de los proyectos que hemos desarrollado ha mostrado que las bombas de calor pueden generar una distancia con las y los usuarios, debido a que parecen más complejas de lo que realmente son. Por el alto costo que tienen hoy en Chile, las bombas de calor parecen ser instrumentos intocables. A esto se suma que los sistemas de distribución del calor como los *fan coils* (muy similares a un sistema de aire acondicionado), no siempre son cercanos sobre todo en la zona sur del país, contextos donde la leña es el energético más comúnmente utilizado a nivel residencial para calefacción. Por ello, hemos aprendido que, a la hora de implementar cambios de sistemas, el acompañamiento, al menos debe ser de un año, tanto para el equipo que opera el sistema como para la comunidad que usa el sistema. Es clave hacer seguimiento de esa fase de ajustes, tanto técnicos, como sociales, asociados a un cambio socio-tecnológico de este tipo.

Por último, los proyectos con bombas de calor nos invitaron a reflexionar y cuestionarnos el concepto de calor. ¿Qué significa el calor? Muchas

¹² Tomás Ariztía, Álex Boso y Manuel Tironi, “Sociologías de la energía. Hacia una agenda de investigación”, *Revista Internacional de Sociología* 75 (2017).

veces escuchamos que el calor era un espacio de reunión, de conversación, cocción de alimentos... ¿Cómo la geotermia se puede hacer cargo de esas experiencias? En este sentido, los proyectos de uso somero o directo de geotermia debieran incorporar esta mirada para no transformarse en una oposición a la experiencia previa, sino en una apuesta tecnológica que nos permita mantener algunas prácticas tradicionales, pero que nos invite a innovar y a cuidar el medio ambiente, sobretudo en el contexto de cambio climático y urgencia ambiental donde la utilización de fuentes como la geotermia permitirían cuidar y mejorar la relación entre la energía y la sociedad.

4. Conclusiones

A través de este capítulo hicimos un recorrido por aquellas consideraciones sociales y culturales que fuimos reuniendo con el pasar de los años en CEGA. Desde el área Geotermia y Sociedad hicimos, desde el 2016, esfuerzos por incorporar estas variables en los proyectos de geotermia somera, en los trabajos de investigación y en cada intervención realizada. Confirmamos que las comunidades locales expresan la necesidad de un relacionamiento temprano, tanto con la empresa como con el Estado, procurando un respeto a la cosmovisión indígena, los protocolos culturales y la institucionalidad indígena de los pueblos originarios.

Confirmamos también que existe poco conocimiento técnico sobre geotermia y que se requieren esfuerzos adicionales por ser una energía que —aunque la podemos ver a través de sus termas y volcanes— no es socialmente conocida por quienes conformamos este país.

En esta materia, es especialmente necesario evitar un relacionamiento transaccional entre empresas y comunidades, o entre universidades y comunidades, el cual ignore el enfoque de derechos. La energía muchas veces ha generado división en las organizaciones y en los territorios, sobre todo en el caso de los proyectos de generación de electricidad, por ello, la propuesta desde CEGA es incluir la mirada social, porque creemos que la geotermia es una oportunidad democratizadora de igualdad y justicia energética.

Desde este espacio —y quien escribe— estamos convencidos de que la geotermia puede ser una alternativa para disminuir la pobreza energética de Chile, por ello, es clave integrar a las comunidades, generar espacios de diálogo para sensibilizar sobre las oportunidades de uso de esta energía en los distintos territorios y fortalecer capacidades locales. Los proyectos geotérmicos demandan una mirada colaborativa y una integración de actores. Esperamos que los casos y los aprendizajes de este capítulo sean un insumo para que en el futuro se pueda contar con más experiencias geotérmicas en el país.

Agradecimientos

Este capítulo reúne conversaciones y miradas de todos aquellos y aquellas que participaron en las actividades impulsadas por CEGA. Por ello, agradecemos a todas y todos quienes fueron parte de estas iniciativas, de los talleres y proyectos. Gracias por confiar en nuestro trabajo y por darnos un espacio y regalarnos su tiempo para hablar sobre el calor de la Tierra. Agradecemos también el aportes de un grupo de científicos sociales y periodistas quienes realizaron entrevistas y actividades en terreno en el marco del área Geotermia y Sociedad del CEGA y que fueron parte de las intervenciones señaladas en este capítulo. Nuestro agradecimiento a Francisco Godoy, Cecilia Ibarra, María José Ivars, Verónica Carreño, Lorena Caimanque, Bárbara Bravo y Juan Saenz. Un especial agradecimiento a los profesionales del Ministerio de Energía José Quidel y Valentina Gómez, quienes fueron generosos en su conocimiento y apoyaron esta unidad. Por último, agradecimientos al director de CEGA, Diego Morata, quien ha sido el principal impulsor y aliado en integrar una mirada social en el uso y promoción de la geotermia en Chile y me dio la oportunidad de crear el área Geotermia y Sociedad.

CAPÍTULO VIII

Aysén, piloto geotérmico

Cecilia Ibarra, Sofía Vargas Payera, Mauricio Muñoz Morales, Diego Aravena y Juan Sáenz

1. Introducción

Este capítulo muestra cómo la región de Aysén fue acumulando proyectos y experiencia para convertirse en un territorio piloto en desarrollo geotérmico en Chile. Aysén es una de las pocas regiones del país con un estudio detallado del potencial y las posibilidades de la geotermia para el territorio,¹ y su plan de desarrollo energético cuenta a la geotermia entre sus líneas estratégicas.²

Como argumenta el capítulo II sobre la exploración, Chile tiene un gran potencial geotérmico que no ha sido explotado. A lo largo del siglo XX y en los inicios de este siglo, los intentos de desarrollo geotérmico han estado centrados en la producción de electricidad, despreciando la posibilidad de aprovechar la geotermia somera. El uso de bombas de calor geotérmico aparece en Chile recién después de 2010 como una posibilidad real para satisfacer las necesidades térmicas y reemplazar otras fuentes de energía. Esto a pesar de que a nivel internacional su uso es amplio desde hace varias décadas.³

La contaminación del aire por material particulado es uno de los principales problemas ambientales que afecta a Coyhaique, capital regional, con sus consecuentes efectos en la salud y bienestar de la población y de los ecosistemas. Desde el 2010 al 2013, las concentraciones anuales y diarias de material particulado respirable MP_{10} fueron un 70% y un 135% por sobre la norma.⁴ La contaminación se debe en gran medida al uso de leña como principal combustible para satisfacer necesidades térmicas en la mayoría de las habitaciones de uso residencial (donde además se utiliza para cocinar), oficinas y servicios. Esta ciudad cuenta con estaciones de medición de calidad del aire, otras ciudades de la región tienen condiciones

¹ CEGA, *Informe proyecto Fondo de Innovación para la Competitividad (FIC): Estimación y valorización del potencial geotérmico en la Región de Aysén*. (Chile: CEGA, 2017).

² Ministerio de Energía, *Energía 2050. Política Energética Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo* (Chile: Ministerio de Energía, 2018). Disponible en: <https://www.mienergia.cl/centro-de-recursos/politica-energetica-region-de-aysen-y-carlos-ibanez-del-campo>

³ John W. Lund and Aniko N. Toth. "Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review". *Geothermics* (febrero, 2021), p.101915. K.J. Chua et al. "Advances in heat pump systems: A review". *Applied Energy* 87, no. 12 (julio, 2010): 3611-3624.

⁴ Ministerio del Medio Ambiente, Departamento de Economía Ambiental, *Análisis general del impacto económico y social del anteproyecto del Plan de Descontaminación Atmosférica de Coyhaique por MP_{10}* . (Chile: Ministerio de Medio Ambiente, 2014).

similares, pero no hay mediciones que confirmen el grado de polución. El año 2012 Coyhaique fue declarada zona saturada por material particulado respirable (MP_{10}). El 2016, fue declarada zona saturada para material respirable fino ($MP_{2,5}$) y se publicó el Plan de descontaminación atmosférica, que fue actualizado el año 2019.

Las largas épocas frías del año generan una alta demanda térmica en Aysén, principalmente para calefacción de ambientes, pero también para usos productivos, como son el secado de madera o el cultivo en invernaderos climatizados. La demanda energética se concentra en el transporte (35%), uso residencial (24%) e industria y minería (23%).⁵ La política de desarrollo local y el plan energético⁶ priorizan la adopción de fuentes de energía renovable y la independencia energética de esta región remota, que depende de combustibles importados. En 2018, el balance energético de la región mostraba que aproximadamente un 70% de la energía consumida corresponde a derivados del petróleo, un 24% a biomasa y solo un 5% a electricidad. En esta región extensa de la Patagonia, donde habitan alrededor de 100.000 personas, los sectores más importantes en la actividad económica son la administración pública y los servicios (personales, financieros e inmobiliarios).

Considerando la demanda térmica y el contexto socioambiental de la zona, este capítulo plantea que Aysén se convirtió en una región pionera y piloto en el aprovechamiento de la geotermia de uso directo o geotermia somera del país, y, además, ha expandido hoy sus oportunidades de generar electricidad con geotermia.

Luego de analizar el recorrido de Aysén en el desarrollo de proyectos con los que acumuló experiencia y aprendizaje, concluimos que una posible explicación es la alineación de actores regionales que unieron fuerzas para convertir a Aysén en pionero geotérmico. El trabajo mancomunado de colaboración entre distintas reparticiones del Estado, academia, privados y organizaciones comunitarias no suele ser la norma en Chile, y abundan las recomendaciones de los beneficios que tendría un trabajo integrado, al menos entre los distintos ministerios públicos. La experiencia de Aysén en geotermia es, por lo mismo, una oportunidad para aprender sobre procesos de colaboración y coordinación entre distintos actores.

A través de una visión retrospectiva, este capítulo muestra y analiza el proceso de promoción del uso de la geotermia en Aysén, desde la perspectiva del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA). A partir de una primera invitación desde la región, en los últimos cinco años el CEGA ha liderado seis proyectos geotérmicos en tres comunas. La presentación y el análisis se centran en la participación de distintos actores

⁵ *Ibíd.*

⁶ *Ibíd.*

en estos proyectos, reconociendo la importancia de las características particulares de la región, en cuanto a su cultura e historia, y el rol de personas clave.

2. Aysén patagónico

Cuando se lee de Aysén o Patagonia central —la de los archipiélagos y de la carretera Austral— es común encontrarse con referencias a su cualidad de “región nueva”. Una diferenciación extraña considerando que el proceso de regionalización ha sido reciente para todo el territorio nacional, que desde la dictadura cívico-militar divide al país en unidades político-administrativas bajo un enfoque centralista. Arica y Parinacota, Los Ríos y Ñuble son regiones posteriores al 2007, pero no se las identifica como “nuevas”, porque la carga que trae consigo Aysén impone un paradigma diferencial.

Así, sus más de diez millones de hectáreas, sin ciudades coloniales ni grandes monumentos prehispánicos ni modernos, han construido el imaginario de un vasto territorio despoblado, lleno de bosques, pampas y masas de agua en sus diferentes estados, que se asocia a oportunidades y a la imagen de un inmenso parque natural entre Puerto Montt y Punta Arenas. En Aysén, cualquier acción humana se ve opacada ante la inmensidad de sus atributos naturales, haciendo imperceptibles los doce mil años de ocupación humana, testimoniales en exiguas puntas de proyectil de cazadores-recolectores o en dispersas taperas del tiempo clímax de la actividad ganadera.

Entonces, ¿cómo un lugar tan periférico al desarrollo se ha convertido en espacio para el emprendimiento e innovación? Nuestra interpretación tiene que ver con un aspecto característico del poblamiento de Aysén en el último siglo. Habitar en una frontera nacional y natural forjó una identidad que valora el ingenio y la improvisación por sobre la riqueza material, porque la experiencia de colonización es muy fuerte y aún está latente que un alambre en el fin del mundo puede salvarte más que millones de pesos en el bolsillo, e incluso en la actualidad, ¿qué sentido puede tener el vehículo más costoso en caminos enripiados que se cortan año a año? Vivir en estos lugares implica una cuota de riesgo asumido, las herramientas para enfrentarlo son el reconocimiento a la posibilidad de fracaso y el atrevimiento junto al saber-práctico. Estas herramientas han demostrado en reiteradas ocasiones ser superiores a los intentos de planificación que minimizan la ocurrencia de fenómenos incontrolables, los que lamentablemente ocurren mucho en el territorio de las cuatro estaciones en un día.

Por otro lado, el retrato de desierto patagónico ha sido el motor de múltiples incursiones contemporáneas —en su mayoría osadas—, a un territorio donde “todo está por hacer”. Esta imagen, que desplaza lo inhóspito por la tierra de oportunidades, nace a partir de la década de 1960, siendo acuñada por el gobierno en un llamado a invertir en esta “isla” aún por definirse y con gran potencialidad de progreso.⁷ Lo interesante es que no solo ha persistido el marketing global de esta idea, sino que también se ha internalizado en la población local un imaginario que demanda progreso, pero ajustado a sus propios ritmos y formas. Un ejemplo de esto es el caso de Hidroaysén, proyecto emblemático de generación hidroeléctrica que ya se proyectaba en la década de 1960. Cuarenta y cinco años más tarde, cuando por fin encontró factibilidad técnica y económica, tropezó con un movimiento de resistencia local e internacional de protección medioambiental que impidió su materialización.

Las últimas décadas en Aysén han estado marcadas por este proceso, por un lado, la victoria del movimiento Patagonia sin Represas (2004–2012) que desplegó el reconocimiento identitario, así como la capacidad de agencia y el debate de qué tipo de desarrollo es el deseable para el territorio y, por otro, el movimiento social por Aysén “Tu Problema es mi Problema” del 2012, que articuló a la población exigiendo once puntos que garantizaran la integración de Aysén al desarrollo nacional, los que iban desde salud de calidad a regionalización de recursos naturales, soluciones a los altos precios de los combustibles, rutas de acceso para todos los pobladores y una universidad pública regional, entre otras. Si bien solo se consiguieron tres puntos del petitorio original, la región se encontraba en ese entonces con recursos financieros y disposición a invertir en ideas nuevas que se alinearán con su imagen objetivo: un territorio sustentable que ponga freno a los problemas de contaminación y amenaza medioambiental.

Esta imagen plantea desafíos importantes. Las ciudades de la región tienen serios problemas de calidad del aire y se cuentan entre las más contaminadas del país y del mundo. En esta región fría, la leña es el principal combustible y otras fuentes de energía son importadas desde otras regiones.

3. Proyectos de geotermia en Aysén

Esta sección hace un recuento de los proyectos adjudicados al CEGA por la Región de Aysén. Buscamos visibilizar este recorrido para describir sus aciertos y errores, y cómo éstos fueron fuentes de aprendizaje. En esta recopilación, ponemos el foco en los actores involucrados en cada experiencia, sus roles y las relaciones entre ellos.

⁷ Véase el documental “Una isla llamada Aysén”, de 1966.

Potencial geotérmico de Aysén

Durante dos años el CEGA cuantificó el abundante potencial de energía bajo tierra que tiene la región patagónica, y los distintos usos que pueden aplicarse en cada área, que van desde la generación eléctrica hasta la climatización de hogares y procesos productivos acordes a las necesidades industriales de la zona.

GENERACIÓN ELÉCTRICA



Si bien el potencial geotérmico es ilimitado, en estas localidades de Aysén podría instalarse una pequeña planta de generación eléctrica de 2 a 5 Mw, pensando en satisfacer las necesidades energéticas de la zona y potenciar sus industrias locales.

Bomba de calor Geotérmica



Permiten transferir calor o frío desde y hacia la tierra, hasta los espacios que lo requieren. Las BCG transfieren calor con la ayuda de serpentines que se instalan bajo tierra y un compresor.

Uso directo de termas



Las zonas con afloraciones de aguas termales pueden aprovechar directamente la temperatura de los fluidos, sin la necesidad de instalar una BCG.

USO DIRECTO DEL CALOR DE LA TIERRA

CLIMATIZACIÓN DE AMBIENTES



Es el uso más popular de la geotermia en el mundo. Casi un 70% del uso directo de la geotermia en el planeta se aplica en climatización de ambientes, ya sea a través de bombas de calor o usando directamente una fuente termal.

SECADO DE MADERA



Aysén es una de las regiones con peor calidad del aire del país, principalmente por el alto consumo de leña, lo que empeora cuando la leña está verde. El Centro de Energía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas junto al CEGA instalarán en esta región el primer secador de leña geotérmico del país.

CLIMATIZACIÓN DE INVERNADEROS

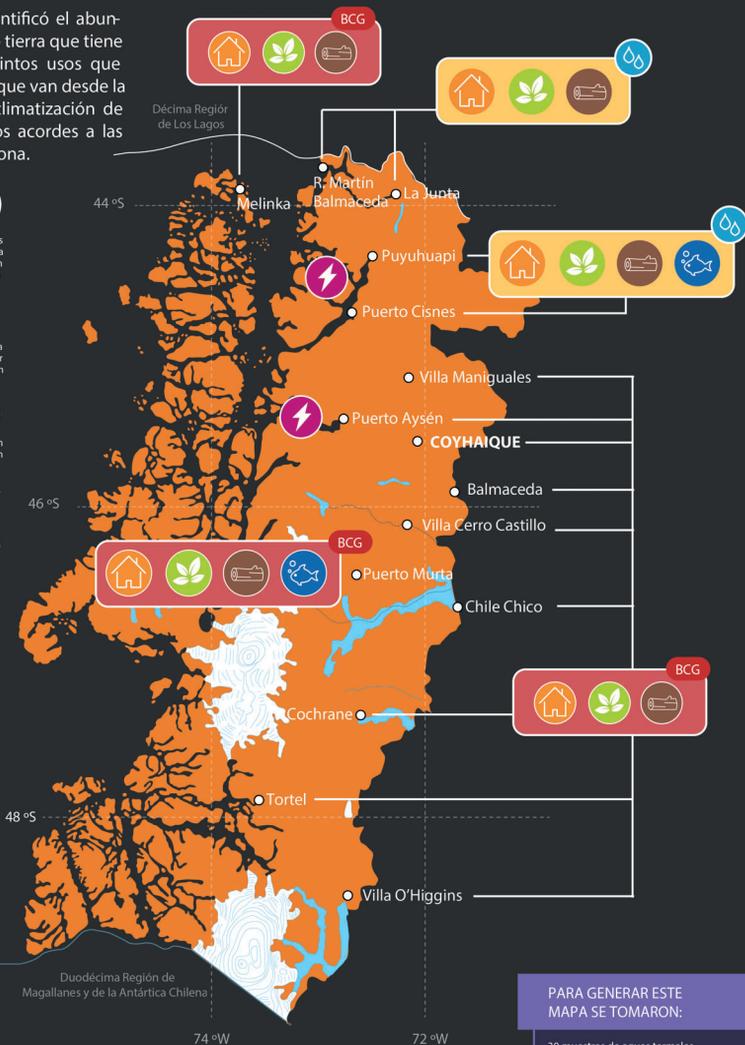


Actualmente 31 países usan la geotermia para producir frutas, verduras y flores. Esta tecnología permite la producción agrícola durante todo el año, incluso en zonas con climas más extremos, como Aysén. En 2017, CEGA inauguró el primer invernadero geotérmico de la Patagonia, en Puerto Aysén.

ACUICULTURA



Los criaderos de peces son una de las industrias regionales que más podría beneficiarse del uso de la geotermia para calentar el agua que requiere en estos procesos. La producción de salmón, trucha y tilapia se cuentan dentro de las especies más beneficiadas por esta tecnología verde de producción.



PARA GENERAR ESTE MAPA SE TOMARON:

- 30 muestras de aguas termales
- 2 muestras de gas
- 13 muestras de agua nieve, lluvia, ríos y lagos

Se registró la temperatura bajo suelo cada una hora por un año. Se midió el espesor de la cuenca y la profundidad del agua subterránea.



www.cegoa.ing.uchile.cl

CEGA_uchile

CEGA Ageo termia

cegoa.ing.uchile.cl

Figura 1. Potencial geotérmico de Aysén. Archivo CEGA.

3.1. Potencial geotérmico de Aysén (Proyecto FIC)

El proyecto FIC de exploración del potencial geotérmico de Aysén⁸ es reconocido como el punto de partida para la geotermia en la región. El objetivo de la exploración coincidía con la imagen predominante en el país respecto de la geotermia y sus posibilidades para el aprovechamiento energético. Ana Valdés, la entonces secretaria regional ministerial (seremi) de Minería, contactó al CEGA para pedirle realizar un estudio exploratorio, un mapa de las posibilidades de geotermia de la región. Se trataba de un proyecto de investigación aplicada, y para el CEGA representaba claramente una oportunidad, puesto que el trabajo resultante de un estudio de este tipo tiene un alto valor académico, que también podía traducirse en un material de información para la ciudadanía y sus autoridades. Era evidente que los resultados podrían ser publicados en revistas científicas especializadas y, por lo tanto, sería una contribución en el cumplimiento del CEGA con la exigencia prioritaria de la agencia que lo financia, CONICYT (actual ANID).

El valor académico de los resultados fue una motivación importante en el comienzo. No obstante, había también motivaciones personales de contribuir con la región, que fueron creciendo a medida que el CEGA se fue conectando con las necesidades que le mostraban los políticos y técnicos de la zona.

La primera campaña de recopilación de información para el proyecto FIC, realizada en 2015, duró cerca de cuatro semanas, y se reunió una enorme cantidad de datos. La exploración geológica incluyó la medición de propiedades termales de las rocas y sedimentos y la instalación de sondas registrando la temperatura a dos metros de profundidad. En muchas áreas de la región se usaron técnicas geofísicas de exploración: gravedad, ERT, TEM y MT.⁹ El equipo de investigación se dividió para recorrer la mayoría de las áreas termales de la región, realizando un muestreo de las aguas para analizar su composición química.¹⁰ En esta campaña, el equipo recorrió el territorio, recolectó muestras y datos, como se resume en la tabla 1.

⁸ CEGA, *Informe proyecto Fondo de Innovación para la Competitividad (FIC): Estimación y valorización del potencial geotérmico en la Región de Aysén*. (Chile: CEGA, 2017).

⁹ Diego Aravena et al. "Geothermal exploration in the Aysén region, Chilean Patagonia" (Presentado en "38th New Zealand Geothermal Workshop", Nueva Zelanda, noviembre 2016).

¹⁰ Angello Negri et al. "Decoding fjord water contribution and geochemical processes in the Aysén thermal springs (Southern Patagonia, Chile)", *Journal of Geochemical Exploration* (febrero, 2018): 185, pp.1-13.

Tabla 1. Campaña 2015, Región de Aysén

Exploración geológica-hidrogeológica	Exploración geoquímica	Exploración geofísica
12 secciones delgadas de muestras de roca en la región	53 muestras para análisis de elementos mayores, trazas e isótopos	Más de 400 estaciones de gravimetría en Coyhaique
Sitio de estudio con registro de temperaturas a 80 y 145 cm hasta completar un año	30 muestras de agua en 15 fuentes termales de la región	432 sondajes eléctricos distribuidos en 9 perfiles en Coyhaique
Temperatura de agua subterránea en 8 pozos	13 muestras de agua en nieve, lluvia, ríos y lagos	Más de 50 estaciones de gravimetría en Puerto Aysén
Más de 20 mediciones de conductividad térmica del suelo	8 muestras de agua de fiordo	Interpretación de 1 perfil sísmico de 700 m en Puerto Aysén (Vera E. com.per)
Catastro de unidades volcánicas activas (volcanes y conos mono-genéticos)	2 muestras de gas en Puyuhuapi	

Durante el segundo año del proyecto, el trabajo se concentró en analizar los datos y usarlos para desarrollar herramientas de planificación: mapas de favorabilidad geotermal, mapas de zonificación urbana para la instalación de bombas de calor geotérmico y estimaciones de potencial de generación eléctrica, entre otras formas de visualización de los datos. El equipo entendía que era importante transformar la investigación teórica en investigación aplicada que fuera útil para el diseño e instalación de prototipos.

En esa etapa de análisis y visualización de data, uno de los integrantes del equipo del CEGA, Mauricio Muñoz, comenzó su tesis de magister. Como proyecto de grado, Mauricio construyó un modelo numérico para simular el uso de bombas de calor geotérmico en un edificio del gobierno regional, ubicado cerca del centro de Coyhaique.¹¹ Este trabajo permitió mostrar el uso de los resultados en la práctica, y fue parte de la presentación final del proyecto, que se realizó en el mismo edificio para el que se había hecho la simulación.

¹¹ M. E. Muñoz Morales, "Bomba de calor geotérmica con intercambiadores de calor verticales cerrados en Coyhaique" (tesis de magister, Departamento de Geología, Universidad de Chile, 2018).

En ese entonces, el equipo contaba con un ingeniero mecánico, Rodrigo Maripangui, quien desarrolló los cálculos necesarios para proyectar el efecto que tendría la implementación de bombas de calor geotérmico en el plan de mitigación de contaminación por material particulado. La contaminación del aire era y es un tema sensible no solo para las autoridades, sino también para la mayoría de las y los ayseninos, quienes viven diariamente las consecuencias del impacto de la combustión a leña en la polución del aire. La presentación de resultados finales logró crear una sensación de que la geotermia podía funcionar para solucionar el problema. Al finalizar el proyecto FIC, en 2016, la geotermia se mostraba como una oportunidad para la región y el equipo CEGA vio una posibilidad de seguir trabajando en Aysén en proyectos aplicados de uso de la energía geotérmica.

Los proyectos de aplicación comenzaban a posicionarse como una opción y se esperaba que sus resultados tuviesen un efecto demostrativo. El uso de la energía geotérmica para climatizar espacios habitables y productivos era una innovación en la región, aunque no lo fuera para el mundo o para el país, donde ya habían experiencias. Una innovación tiene la característica de novedad y se considera que no es un invento aislado solo cuando empieza a entregar beneficios y su uso se expande.¹² Dentro de las características de la etapa emergente de una innovación tecnológica como ésta se destaca que a) los costos son más altos que cuando se logra una situación de régimen, b) se necesita una inversión inicial para lograr los aprendizajes que permitan generar capacidades, c) se requiere solucionar problemas de adaptación a las condiciones locales y de articulación de actores, entre otros. Esto es un asunto bien conocido en la literatura sobre procesos de innovación tecnológica¹³ y que resulta intuitivo. Los proyectos exitosos suelen tener un efecto demostrativo importante, “ver para creer” parece ser el lema que se aplica frente a una tecnología desconocida y que representa un riesgo financiero, por la inversión inicial y de cambio de prácticas.

En el caso de Aysén, los primeros proyectos con bombas de calor no fueron exitosos. Cuando hay proyectos iniciales que no alcanzan sus objetivos, el efecto demostrativo funciona en sentido contrario a la difusión de la innovación y sus efectos suelen marcar el desarrollo futuro, exigiendo de perseverancia para superarlos.¹⁴

Uno de estos casos fue el proyecto que buscó calefaccionar el jardín infantil Lobito Feroz con bombas de calor geotérmica, el cual fue mencio-

¹² OECD/Eurostat. *Oslo Manual: Proposed Guidelines for Collecting and Interpreting Technological Innovation Data, 4th Edition.* (Paris/Eurostat, Luxembourg: OECD Publishing, 2018).

¹³ Ver por ejemplo, Joe Tidd y John Bessant, *Managing Innovation* (Londres: John Wiley and Sons, 2018). C. Ibarra, “Capability accumulation in three natural resource based industries in Chile” (tesis de doctorado, SPRU, University of Sussex, 2013).

¹⁴ Ibid.

nado por residentes de Coyhaique en actividades realizadas por CEGA por ser un sistema que tuvo fallas técnicas que impidieron su funcionamiento. Otro proyecto que no alcanzó las expectativas fue una iniciativa liderada por el Centro de Energía de la Universidad de Chile, el cual, a nivel local, no cumplió con los objetivos iniciales. Este proyecto buscaba construir un piloto en secado de leña e invernadero para el cultivo agrícola. El CEGA participó como institución asociada asesorando en la componente geotérmica del sistema de captación y distribución de calor, tanto en el secador de leña como en el invernadero. Si bien, esta iniciativa no fue exitosa, miramos este proyecto desde el aprendizaje, pues visibilizó importantes lecciones desde lo administrativo y desde lo técnico, relevando la importancia de un acompañamiento y seguimiento desde lo técnico y social, especialmente cuando se trata de una tecnología incipiente. Además de la necesidad de considerar aspectos estratégicos como el encadenamiento productivo y el modelo de negocio del proceso y, asuntos clave, como la conexión eléctrica.

Si bien estos proyectos fueron parte de la discusión pública en Coyhaique, principalmente sobre los riesgos de utilizar sistemas con bombas de calor, la necesidad de cambiar las fuentes de calefacción ante el complejo problema de polución del aire era un fuerte argumento para perseverar en la posibilidad de innovar usando geotermia. Así fue como se sumaron nuevos proyectos que contaron con financiamiento local y nacional (ver tabla 2), mostrando el compromiso con esta alternativa para satisfacer las necesidades energéticas de la zona.

Tabla 2. Proyectos geotérmicos desarrollados por CEGA en Aysén entre 2014 y 2021

Proyecto	Institución responsable / ejecutora	Actores con compromiso formal	Financiamiento	Años
Estimación y valoración del potencial geotérmico en Aysén	CEGA	<ul style="list-style-type: none"> •SEREMI de Minería de Aysén •CEGA 	FIC + CEGA	2 2014 a 2016.

Proyecto PNUMA	Centro de Energía - FCFM (Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile)	Institución asociada: CEGA	10YFP Trust Fund. Sustainable Lifestyles and Education (SLE) Programme. United Nations Environment Programme	2 2015 a 2017
Climatización invernadero Centro de Educación y Trabajo Valle Verde	CEGA	<ul style="list-style-type: none"> •Gendarmería de Chile •SEREMI de Medio Ambiente 	Fondo de Acceso a la Energía, FAE+ CEGA	1 2016
Innovación para la reinserción social: seguimiento de invernadero CET	CEGA	<ul style="list-style-type: none"> •Gendarmería de Chile •SEREMI de Desarrollo Social •Universidad de Aysén 	Chile para todas y todos Ministerio de Desarrollo Social y Familia	1 2018
Climatización liceo Altos del Mackay	CEGA	<ul style="list-style-type: none"> •Secretaría Ministerial de Educación •Ilustre Municipalidad de Coyhaique •SEREMI de Energía •SEREMI de Medio Ambiente 	FIC + CEGA	2 2018 a 2020
Factibilidad de cogeneración geotérmica en Puyuhuapi	CEGA	<ul style="list-style-type: none"> •SEREMI de Medio Ambiente •SEREMI de Minería •Universidad de Aysén •EDELAYSEN 	FIC + CEGA	3 2019 a 2022

Climatización de un establecimiento educacional en Cisnes	CEGA	•Ministerio de Energía	División de acceso y desarrollo social, Ministerio de Energía	2 2021a 2022
---	------	------------------------	---	--------------------

3.2. CET Valle Verde: climatización (2016-) y seguimiento

El proyecto “Invernadero geotérmico para la reinserción social en Aysén”, realizado entre 2016 y 2017, fue el primer proyecto del CEGA de instalación de un sistema de calefacción con bombas de calor geotérmico. El Centro de Educación y Trabajo (CET) Valle Verde acoge a internos e internas del sistema penitenciario chileno ofreciéndoles preparación efectiva para el trabajo, simulando condiciones en el medio libre, y es parte de los programas de Gendarmería para la reinserción laboral en el sistema penal actual.

El equipo del CEGA conoció el CET Valle Verde de Gendarmería, ubicado a 10 km de Puerto Aysén, durante la exploración geológica en el contexto del proyecto FIC de 2015. Cuando el CEGA realizaba el levantamiento geotérmico en la región, recorrieron el territorio, conversaron con sus habitantes y realizaron actividades de difusión en medios locales. Por ejemplo, los integrantes del CEGA conversaban sobre geotermia cuando pedían autorización para sacar muestras o realizar mediciones en predios privados. Esta fue una oportunidad para contar las expectativas de la exploración en las radios de las ciudades o pueblos donde se llevaban a cabo los trabajos. Así fue como desde el CET Valle Verde contactaron a los profesionales del CEGA, a través de la SEREMI de Energía y Minería, para conocer la posibilidad de que la geotermia permitiera cultivar hortalizas durante todo el año en sus invernaderos de Puerto Aysén. La idea de una posible aplicación surgió después de una visita del ingeniero mecánico del CEGA Rodrigo Maripanguí a las dependencias del CET Valle Verde, y gracias al excelente compromiso de los funcionarios de Gendarmería.

En esa época, Nicolás Hurtado, estudiante de ingeniería mecánica, trabajaba en su memoria de título “Evaluación del uso de bombas de calor geotérmicas en invernaderos”,¹⁵ que fue la base para el proyecto del invernadero del CET. Con el compromiso de Gendarmería y al trabajo realizado previamente en la región, CEGA postuló y ganó un fondo del Ministerio de Energía para calefaccionar uno de los invernaderos. El Fondo de Acceso a la Energía (FAE) financió la instalación de un sistema de climatización con bomba de calor geotérmica para uno de los nueve invernaderos del CET. Lo que se buscó fue obtener cultivos de hortalizas todo el año y apoyar la reinserción social de esta comunidad.

¹⁵ Nicolás Gabriel Hurtado, “Evaluación del uso de bombas de calor geotérmicas en invernaderos” (tesis de grado, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile, 2017).



Figura 2. CET Valle Verde. Fuente: Archivo CEGA.

Una de las primeras acciones del proyecto fue mejorar la aislación térmica del invernadero intervenido, con el propósito de reducir sus pérdidas de calor. En paralelo, se instaló el sistema de calefacción, que consistió en un intercambiador de calor geotérmico horizontal cerrado, acoplado a una bomba de calor y a un acumulador de calor. El calor se distribuyó en el invernadero mediante dos ventilos convectores o *fan coils*.

En Puerto Aysén, el subsuelo tiene una temperatura que va entre los 6 °C y los 13 °C a una profundidad de 1,5 metros, durante todo el año y sin fluctuaciones horarias. Gracias a esta estabilidad de la temperatura, es posible usar un colector subterráneo horizontal de calor (1.400 metros de tuberías de polietileno) que se entierra a 2 metros de profundidad, y por donde se hace circular agua muy fría (~1 °C). El agua fría se calienta en contacto con el subsuelo y retorna a la superficie aproximadamente 3 °C más caliente de lo que entra (~4 °C). Dentro de la bomba de calor, un intercambiador extrae el calor del agua y la vuelve a enfriar a 1 °C, lista para retornar al colector subterráneo. Finalmente, un sistema de compresión de gases permite concentrar todo el calor colectado en un segundo circuito de agua, a ~45 °C, la que se almacena en un estanque de 2.000 L para su posterior circulación en el sistema de *fan coils*, que distribuye el calor colectado hacia el interior del invernadero.

La temperatura constante del subsuelo permite calefaccionar el invernadero a lo largo de todo el año con un bajo consumo de electricidad, incluso en las noches frías de invierno. La bomba de calor transporta y

concentra calor para llegar a una temperatura adecuada en el invernadero, de alrededor de 18 °C. El colector subterráneo de calor se construyó en un sitio aledaño al invernadero, que la comunidad del CET usa como cancha de fútbol. Para instalar el colector subterráneo se excavaron cuatro trincheras de 2 m de profundidad, 2,5 m de ancho y separadas cada 5 m. Una vez terminado el trabajo de excavación e instalación del intercambiador, se tapó todo y se restauró la cancha de fútbol.

Los desafíos del trabajo en terreno incluyeron conseguir proveedores y aprender a relacionarse con ellos. Por ejemplo, la disponibilidad de servicios de excavación y remoción de tierra es limitada en comparación a las regiones del centro del país y esto dificulta el cumplimiento de plazos y etapas. Hay que considerar, además, que el proyecto de construcción se realizaba en un espacio donde diariamente interactúan los usuarios del CET.



Figuras 3 y 4. Construcción del intercambiador de calor horizontal cerrado. Fuente: Archivo CEGA.

Durante toda la ejecución del proyecto, en 2017, se realizó un trabajo constante con la comunidad beneficiada e intervenida, es decir, los internos e internas y el equipo de Gendermería. El equipo de CEGA estaba integrado por profesionales de distintas disciplinas que abordaron la instalación tecnológica y la apropiación de la innovación por parte de la comunidad. El trabajo con la comunidad tuvo como objetivo informar y entregar capacitación técnica sobre las bombas de calor geotérmico a la comunidad del CET. Se esperaba contrarrestar asimetrías de información y conocimiento sobre la tecnología, y promover un ambiente de diálogo y confianza entre los ejecutores del proyecto y los beneficiarios, que ayudara a promover la reinserción social de los internos. Además, se realizó un trabajo en identificar los factores de la cultura interna del CET que podían incidir en la sustentabilidad en el tiempo de la iniciativa.

El proyecto FAE permitió la aislación térmica y la calefacción del invernadero, además, incluyó el acompañamiento a la comunidad con actividades de información, capacitación y ejecución de aspectos del proyecto, tales como la instalación de la envolvente térmica y adecuación de la infraestructura del invernadero. La bomba de calor geotérmico es el componente más costoso de la instalación, pero no solo por el costo del equipo, sino que además por el consumo eléctrico que requieren las bombas para operar. Nadie había previsto que la provisión eléctrica era inestable en la comuna y que solucionar esta situación tendría un costo y un plazo no considerado en el financiamiento del proyecto. Este inconveniente tuvo como consecuencia que, durante 2018 —el supuesto primer año de marcha en régimen— el sistema no pudiera funcionar de manera continua. Mostrando su compromiso con la inversión realizada, Gendarmería Regional proveyó los fondos propios para reparar la provisión eléctrica y el invernadero geotérmico tuvo su primer año de funcionamiento estable en 2019.



Figura 5. Invernadero climatizado en CET Valle Verde. Fuente: Archivo CEGA.

El CEGA mantenía su interés en este proyecto y realizó un proceso de seguimiento durante 2019 gracias a otro financiamiento, esta vez del Ministerio de Desarrollo Social y Familia, Chile para todas y todos. Esta nueva iniciativa permitió realizar un acompañamiento y comprender las prácticas sociales y culturales asociadas a la utilización del invernadero geotérmico y la innovación.

Los principales beneficiarios de este proyecto fueron los integrantes de la población de internos del CET Valle Verde y el equipo de Gendarmería.

Si bien se buscaba escalar el diseño para aumentar los ingresos, a la fecha la iniciativa ha tenido un impacto social mayor al económico.¹⁶ El proyecto tenía como objetivo declarado el sistematizar la innovación realizada y su impacto en la reinserción social. En la práctica se planteó un objetivo adicional que probó ser relevante: el acompañamiento al proceso de innovación. Luego de un año de visitas y entrevistas con la comunidad del CET, los resultados de esta sistematización indicaron que los proyectos de innovación tecnológica pueden ser un medio para desarrollar habilidades de aprendizaje de nuevas rutinas de trabajo y generar un atractivo para la comunidad local. Esto permite que aumenten las oportunidades de socialización y vinculación con los y las integrantes del CET y del entorno.

Si bien los nuevos procesos y prácticas culturales, como nuevas formas de cultivo y de ventilación, llevados a cabo en Valle Verde a partir del invernadero geotérmico trajeron consigo dificultades, también desencadenaron aprendizajes para una comunidad acostumbrada a trabajar la agricultura con prácticas tradicionales, y que debió flexibilizar sus métodos para ajustarse al proceso de innovación. Por otra parte, se confirmó el rol clave que tienen las instituciones, pues Gendarmería de Chile destacó por su perseverancia y compromiso con la iniciativa, lo que generó que el proyecto geotérmico fuera una prioridad para buscar distintas opciones y alternativas para su funcionamiento. Aquí destacamos el compromiso del director de CET, Karim Laibe, y el profesional de Gendarmería, Andrés Astorga, quienes fueron figuras claves en el proceso de innovación que se desarrolló en esta comunidad. Además, se destaca la participación de Lirian Cofré, profesional de Gendarmería, que coordinó todas las obras de construcción y puesta en marcha de los equipos con gran eficacia, y la continuidad que dio al proyecto el nuevo director de entonces, Walter Muñoz.

En marzo de 2022 se confirmó que el sistema de calefacción no se encuentra en funcionamiento. Luego de no contar con mantenimiento y que los usuarios a cargo del sistema terminaran sus condenas y salieran en libertad, el sistema quedó en desuso.

Desde mayo de 2022, CEGA junto con Gendarmería y el Municipio de Puerto Cisnes buscan vías de financiamiento para reubicar el sistema de calefacción y trasladarlo a las habitaciones del CET, siendo esta la principal necesidad energética de la comunidad. Todos los actores involucrados muestran un alto entusiasmo por este nuevo proyecto.

3.3. Climatización Liceo Altos del Mackay (2018-2020)

Gracias al financiamiento del gobierno regional (FIC 2018), este proyecto buscó aliviar la problemática ambiental de la calefacción de salas de clase con estufas a leña en el Liceo Altos del Mackay, de la ciudad de

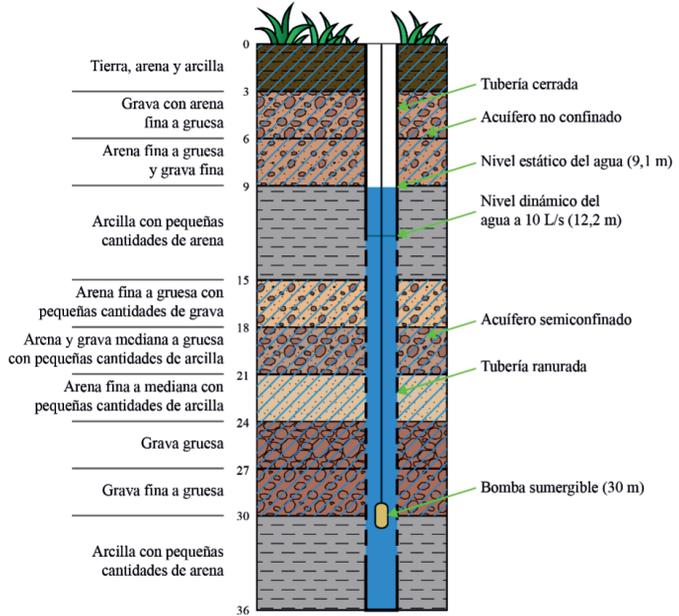
¹⁶ CEGA. Informe final proyecto Chile para todos y todas, 2019.

Coyhaique. La selección de este establecimiento se basó en un análisis multicriterio, considerando entre los requisitos principales la disponibilidad de energía geotérmica, que la matrícula estuviese entre 100 y 500 estudiantes, y que el colegio dependiera de la Dirección de Educación Municipal (DEM).



Figura 6. Bombas de calor geotérmico en Liceo Altos del Mackay. Fuente: Archivo CEGA.

En 2019 se instaló el nuevo sistema de climatización con bombas de calor geotérmico. Dos pabellones del liceo se calefaccionaron con dos bombas de calor geotérmico de 25 kWt cada una, que distribuyen el calor a través de 13 *fan coils* repartidos en las salas de clases y pasillo, y dos radiadores en los baños. A diferencia de los tubos de polietileno que se enterraron a 2 metros de profundidad en Puerto Aysén (un sistema “cerrado” por el que se hace circular agua artificialmente), en Coyhaique se perforaron dos pozos que alcanzan un acuífero: uno para la extracción de agua subterránea y otro para su reinyección, de 36 m y 24 m de profundidad respectivamente (lo que se conoce como un sistema “abierto”). Desde el pozo de extracción se sacan 5 litros por segundo de agua subterránea a $\sim 9^{\circ}\text{C}$, la que pasa por un intercambiador de calor entre el pozo y la bomba de calor. Dentro de la bomba de calor se extrae energía del agua subterránea hasta enfriarla 3°C , momento en que es devuelta al acuífero mediante el pozo de inyección. El calor es concentrado mediante dos bombas de calor y se utiliza para calentar agua a 42°C en un estanque de 1.500 litros, la que luego circulará por los *fan coils* dentro de las salas y pasillos.



Figuras 7 y 8. Pozo de extracción-inyección en Liceo Altos del Mackay. Fuente: Archivo CEGA.

Durante toda la ejecución del proyecto se realizaron talleres de apropiación y transferencia tecnológicas, con el objetivo de sensibilizar a los estudiantes y a la comunidad escolar sobre el uso de energías renovables. Entre las actividades realizadas se cuenta un mural artístico y científico, creado por los estudiantes para sensibilizar sobre las posibilidades de usar la energía geotérmica. También se realizaron talleres sobre geotermia en todos los niveles escolares y con profesores, y mediciones de temperatura con herramientas de ciencia ciudadana, donde los estudiantes compararon la temperatura de salas con distintos sistemas de calefacción. Finalmente, se aplicó una encuesta de confort térmico y se realizaron grupos focales de conversación para medir el impacto observado por los estudiantes del cambio de sistema de calefacción. Entre los aprendizajes de este proyecto, se reveló la importancia de la capacidad de reinyección del pozo cuando se usa un colector abierto. En este caso, se incluyó un pozo de reinyección más pequeño que el de extracción y la mayor parte se ubica en niveles impermeables, lo que hizo complejo el flujo de reinyección de agua. Además, destacamos la importancia de contar con sistemas eléctricos fortalecidos, porque en muchas zonas de Chile, la electricidad es inestable y, si bien los sistemas con bombas de calor utilizan menor electricidad que un sistema convencional, se requiere ampliar la capacidad eléctrica. Por último, desde la componente social, este proyecto destacó la importancia de generar campañas de sensibilización diferenciadas por actor. Esto, porque en una

comunidad escolar se diferencian, por ejemplo, el equipo directivo, docentes, estudiantes, asistentes de la educación y equipo operador del sistema de calefacción y las motivaciones a cambiar de prácticas e incorporar un nuevo sistema son distintas para cada uno. Para cada uno de este grupo, por ejemplo, se requiere realizar actividades que favorezcan su actitud al cambio socio-tecnológico e identificar sus motivaciones durante toda la ejecución del proyecto.

En términos generales podemos agregar que el cambio que significa la climatización de las salas a una temperatura pareja respecto de la calefacción tradicional con estufas a leña, necesita de un trabajo de adaptación. Hay hábitos arraigados, como por ejemplo, secar ropa o los zapatos húmedos cerca de la estufa, prácticas que no sólo se dan en las viviendas, sino también en las escuelas y liceos.



Figura 9. Talleres con estudiantes Liceo Altos del Mackay. Fuente: Archivo CEGA



Figura 10. Mural en la sala de máquinas del Liceo Altos del Mackay. Fuente: Archivo CEGA

Es necesario aprender a valorar las ventajas del nuevo sistema, como aportar a descontaminar y bajar los niveles de deforestación. Los y las estudiantes mostraron, en el caso el Liceo Altos del Mackay, su ingenio para manipular las termocuplas, por ejemplo, porque significa un cambio en la sensación térmica la temperatura pareja de la sala. Todas estas situaciones fueron de aprendizaje para el equipo CEGA y nos confirmó lo fundamental de realizar proyectos interdisciplinarios donde la variable social y cultural es clave para promover cambios culturales dentro de las comunidades.

3.4. Proyecto FIC en Puyuhuapi: “Factibilidad de cogeneración geotérmica en Puyuhuapi”

El conocimiento del recurso energético y la forma adecuada de utilizarlo son críticos para planificar el desarrollo de la región y, gracias a una serie de estudios de potencial geotérmico realizados en la Región de Aysén,¹⁷ se sabía que Puyuhuapi presentaba potencial para considerar un proyecto de suministro eléctrico local. Puyuhuapi es parte de la comuna de Cisnes y alberga a poco más de 500 habitantes. El estudio de factibilidad se realizó con un fondo del Gobierno Regional, FIC 2018, en conjunto con las autoridades y la ciudadanía y tuvo como objetivo generar conocimiento técnico-científico y reducir brechas de información entre los distintos actores locales respecto al recurso energético geotérmico en el territorio.

No es extraño que se generen conflictos entre las autoridades y la ciudadanía cuando hay desconocimiento o desconfianza respecto al tipo de energía y sobre los alcances e impactos de los proyectos. Además, no basta con conocer cuál es el potencial desde un punto de vista geológico, las necesidades sociales son un asunto del territorio y sus habitantes, por ello, el proyecto “Factibilidad de cogeneración geotérmica en Puyuhuapi” buscó integrar a distintos actores sociales en los análisis, entregando información sobre la energía geotérmica e identificando las necesidades energéticas locales que podrían darle sentido a un proyecto de generación eléctrica en Puyuhuapi. Confirmamos que el levantamiento participativo de las necesidades y prioridades locales permite una planificación de proyectos energéticos al servicio de la comunidad, desde una mirada territorial y situada.

Fue así como este proyecto tuvo como objetivo principal determinar la factibilidad de cogeneración de electricidad y calor en Puyuhuapi aprovechando la energía geotérmica. La generación eléctrica mediante geotermia libera una cantidad significativa de calor al ambiente, el que puede ser

¹⁷ Diego Aravena et al. “Gravity, Transient Electro-Magnetic and Noise Seismic Exploration in the Puyuhuapi Geothermal Area, Southern Patagonia, Chile” (Presentado en “*World Geothermal Congress 2020*”. Reykjavik, Islandia, abril 26–mayo 2, 2020). Nicolás Pérez-Estay et al. “Seismicity in a Transpressional Volcanic Arc: The Liquiñe-Ofqui Fault System in the Puyuhuapi Area, Southern Andes, Chile (44° S)”, *Tectonics* (octubre, 2020): p.e2020TC006391.

aprovechado para calefaccionar recintos, una necesidad presente casi todo el año en el clima frío de Puyuhuapi. Este aprovechamiento del calor restante en un proceso de generación de electricidad se llama cogeneración, y es una innovación para la región, no existen iniciativas de este tipo ni se han estudiado antes. El proyecto permitió establecer un modelo conceptual del recurso geotérmico en Puyuhuapi, identificando las alternativas viables de generación eléctrica y térmica. En base a este primer resultado se pudo trabajar en la planificación de las acciones legales que serían necesarias para desarrollar una planta de cogeneración en Puyuhuapi. En paralelo, se trabajó con las autoridades y la comunidad en la identificación de oportunidades y barreras socio-culturales en relación a esta innovación, en educar respecto del potencial geotérmico de la región, disminuyendo brechas de información.



Figura 11. Proyecto FIC, actividades del estudio de factibilidad. Fuente: Archivo CEGA

Como parte del estudio se realizó exploración geológica superficial y dentro de los resultados destacamos que la geotermia sí puede ser una alternativa para producir electricidad en Puyuhuapi. En base a diferentes observaciones geológicas, se estimó que el recurso geotérmico de la localidad podría tener un rango de temperatura entre 120 °C y 150 °C.¹⁸ Acountando el caudal a valores relativamente bajos en comparación a otras plantas geotérmicas del mundo, entre 10 a 60 l/s, resulta en una factibilidad técnica para generar entre 73 y 1.100 kW eléctricos. Sin embargo, ambos parámetros, temperatura y caudal, solo pueden ser confirmados mediante la construcción de pozos exploratorios, etapa que estaba fuera del alcance de este proyecto.

¹⁸ Angello Negri et al. "Decoding fjord water contribution and geochemical processes in the Aysen thermal springs (Southern Patagonia, Chile)", *Journal of Geochemical Exploration* (febrero, 2018): pp.1-13.

Desde la mirada de la cogeneración, se destacan algunos usos que podrían responder a necesidades locales. El primero es un secador de leña con capacidad para secar 70 m³ de leña en cuatro días, suficiente para proveer la demanda anual de leña seca para calefacción de Puyuhuapi. El segundo, un invernadero de 600 m² capaz de satisfacer la demanda anual de hortalizas verdes de Puyuhuapi, y el tercero, un centro termal con capacidad para 75 personas compuesto por una piscina termal semi-olímpica de 300 m², una cafetería de 200 m² y un camarín con baños y agua caliente sanitaria. Siendo la calefacción la principal necesidad energética relevada por la encuesta de pobreza energética que se realizó en la localidad en el marco de este proyecto, una necesidad priorizada desde lo social fue promover futuros análisis de un sistema de calefacción distrital para Puyuhuapi. La mala calidad y alto costo de la leña es la principal preocupación local, el 93% de los hogares usa leña como combustible, con un costo equivalente al 22% del ingreso familiar promedio en la zona.

Cabe destacar que la comunidad de Puyuhuapi se mostró receptiva al proyecto propuesto porque es de una escala pequeña, lo que implica un bajo impacto en el territorio, y porque podría responder a sus necesidades energéticas (75% de la población encuestada apoya el proyecto). Los principales elementos destacados por la comunidad en cuanto al entorno fueron la tranquilidad, el paisaje y la naturaleza, por ello, un proyecto geotérmico debiera conversar con estos elementos claves en la valoración local.

3.5. Climatización de un establecimiento educacional en Cisnes

Gracias al financiamiento del Ministerio de Energía, a través de su División de Acceso y Desarrollo Social, el CEGA, a la fecha del cierre de esta publicación, se encuentra realizando su segundo proyecto de cambio de sistema de climatización geotérmica en un liceo en la región. Se trata del Liceo Arturo Prat Chacón ubicado en la localidad de Puerto Cisnes, comuna de Cisnes. En la actualidad, el liceo es calefaccionado con una caldera a leña y apoyo con combustiones lentas en las salas, y la expectativa es reemplazar este energético en el 100% de las salas de clases y en algunos espacios compartidos del establecimiento educacional. En total, se pretende que el nuevo sistema tenga una cobertura de alrededor de 1.300 m² a través del uso directo con bombas de calor geotérmicas — sistema de captación vertical abierto— y un sistema de distribución de calor centralizado.

Estos proyectos han sido parte del proceso en que la tecnología de bombas de calor y la geotermia fueran pasando de ser una energía desconocida — como sigue siendo en la mayoría del país— a ser una posibilidad real de transición energética local.

4. Afuerinos en Aysén: relatos e intercambios

La geotermia como interés para el conocimiento científico y posibilidad tecnológica llega a Aysén desde afuera. No es un invento local, aun cuando hay historia en usos del calor de la Tierra, como los invernaderos enterrados que recuerdan los ayseninos, según relató un interno del CET.

Quizá sea más preciso decir que la geotermia recibió una invitación desde la región, fueron actores locales quienes buscaron a personas con conocimientos científicos y tecnológicos para explorar las posibilidades de aprovechar esta forma de energía en la región. Una de esas personas fue la seremi de Minería (2014–2017) Ana Valdés, gran promotora de la geotermia como energía limpia y adecuada para las necesidades de su región. En 2015, ella fue la gestora del proyecto de exploración del potencial geotérmico de Aysén y abrió la puerta al CEGA para conocer a los actores locales y hablarles desde los intereses comunes, poniendo en primer lugar las necesidades de la zona. En el camino se fueron sumando nuevos aliados de la “causa geotérmica”, como Julio Uribe, expresidente del CORE, y el senador Antonio Horvarth.

La mayoría de los proyectos geotérmicos de Aysén, en particular todos aquellos que ejecutó CEGA, tuvieron financiamiento del gobierno regional. Además de los actores clave del nivel político, el análisis retrospectivo permite reconocer la importancia de quienes dieron apoyo desde el nivel técnico, personas como Nicolás Carbone de la SEREMI de Energía, Nicolás Smith y Jimena Silva de la SEREMI de Medio Ambiente, y tantas otras que han inspirado la concreción de este escrito, como el caso de Andrés Astorga, desde Gendarmería de Chile. Sumado a personas clave que se interesan en las nuevas tecnologías, en las historias de cambio tecnológico e innovación, es común observar intercambios con actores externos, como el equipo desarrollador y científico, y los diversos actores locales, incluyendo a la sociedad civil.

Las capacidades locales y la experimentación se potencian con transferencias tecnológicas y procesos de innovación abiertos. Esta sección da un espacio a los relatos de los recuerdos personales de algunos actores en este proceso de intercambio con el que se inició la llegada de la geotermia a Aysén. Así, en el recuerdo de Mauricio Muñoz van apareciendo una a una las personas que abrieron el camino al desarrollo de la geotermia en Aysén, en un proceso de mutuo aprendizaje. En el testimonio de Diego Aravena da espacio a la comunicación como una experiencia nueva que se revela como estratégica.

4.1. Mauricio Muñoz: La geotermia como alternativa energética eléctrica y una red que se teje paso a paso

El trabajo del CEGA en Aysén comenzó en 2014, cuando Ana Valdés contactó a Diego Morata, el director del CEGA, para explorar la posibilidad de entregar una alternativa energética para producir electricidad en la región. Esto fue posterior a Hidroaysén, y Ana Valdés, que es geóloga, ocupaba el cargo de secretaria regional ministerial (seremi) de Minería de Aysén. Desde ese momento, los grandes aliados del CEGA para iniciar un trabajo en la región fueron Ana Valdés, Julio Uribe, del Consejo Regional (CORE) y Juan Antonio Bijit (SEREMI de Energía). Ellos fueron, por ejemplo, importantes apoyos cuando Gendarmería se acercó a la SEREMI de Energía para buscar una solución a los invernaderos y logramos juntar a las personas necesarias para postular el proyecto del CET Valle Verde. Cabe destacar que la gente del CET se acercó a la SEREMI de Energía y no a la SEREMI de Minería o a nosotros.

En 2015 y 2016 hicimos difusión del proyecto en que estábamos, el FIC. Eran acciones dispersas, gatilladas más que nada por la intención de Ana de mostrar el trabajo que se estaba haciendo. Fuimos a un par de radios y a un canal de televisión local. Esa difusión nos llevó a tener contacto con personas que nos mostraron el camino que actualmente tiene la unidad de proyectos, recuerdo por ejemplo a tres académicos del campus Patagonia de la Universidad Austral, Eduardo Aedo, Luis y Juan Carlos Osorio. Ellos nos mostraron, con peras y manzanas, que la necesidad de la región era térmica y no eléctrica.

Con el financiamiento FAE para el CET en la mano y listos para construir el invernadero en Valle Verde, llegamos a contactarnos con muchas más personas del gobierno regional, entre ellos la ex-intendenta y actual senadora, Ximena Rincón, y el seremi de Agricultura Horacio Velásquez. Expusimos nuestros resultados en una sesión del CORE y estaba el senador Antonio Horvath, que se entusiasmó con el trabajo porque le hacía sentido para la región. Su apoyo generó confianza y otras personas del gobierno regional también se motivaron con la geotermia.

Sin mucha estrategia, nos pusimos a buscar oportunidades de financiamiento para seguir trabajando en la región. En paralelo, íbamos consiguiendo socios políticos y ganando el cariño de la gente. Creo que nos sirvió mucho ser jóvenes y ser hartos. En el equipo había gente como Rodrigo Maripanguí, que es muy cercano con las personas, y cuando íbamos a hacer alguna medición o sacar una muestra se tomaba el tiempo para explicar detalladamente lo que hacíamos y sus alcances.

En ese periodo de 2016 y 2017 aparecieron en nuestro camino muchas personas valiosas, comprometidas con el bienestar de la región, eran de la Universidad, de los servicios públicos y del Gobierno Regional.

4.2. Diego Aravena: La geotermia en la radio y televisión local, una estrategia espontánea

La primera semana de enero del 2015 partimos a nuestro primer terreno de la campaña de exploración en Aysén. Éramos un grupo grande, compuesto por profesores, investigadores y estudiantes. Varios geólogos: Linda Danielle, Mauricio Muñoz y yo; un ejército de estudiantes de geofísica lideradas por Karin García: Daniela Montecinos, Valentina Reyes y María de Los Ángeles Uribe, un ingeniero mecánico —Rodrigo Maripanguí— y un alumno de Linda que estaba haciendo su magister, Angello Negri.

Una característica única de ese terreno fueron las apariciones en medios: radios, diarios y hasta un programa de televisión regional. Una de las primeras entrevistas que gestionó Ana Valdés fue en radio Las Nieves, donde fuimos con Angello Negri a hablar sobre el proyecto y sobre qué es la geotermia. Ya entonces teníamos una noción de lo bueno que era comunicar lo que estábamos haciendo, pues nos ahorra explicaciones cuando íbamos a terreno. Lo que no sospechábamos era el alcance que tienen las radios y canales regionales en Aysén. Nos pasó más de una vez que al llegar a alguna casona o poblado empezábamos a explicar el proyecto y nos decían: “ah, ustedes son los de la radio”, no hay mejor forma de romper el hielo.



Figuras 12 y 13. La geotermia en la radio y televisión local. Fuente: Archivo CEGA.

Durante el primer año de campañas también trabajamos con dos alumnos alemanes que estaban haciendo sus MSc, Sarah Váltinke, ingeniera mecánica, y Florian Schaefer, geólogo, de las universidades de Bochum y Jena, respectivamente. Con ambos generamos excelentes relaciones y fueron un gran aporte al equipo.

Para el final del primer año ya habíamos viajado varias veces a la región y contábamos con una cantidad abrumadora de datos. El “Café con-ciencia” fue la oportunidad perfecta para mostrar los avances. En una schopería del centro de Coyhaique se desarrolló esta especie de reunión informal donde presentamos los resultados del primer año de campaña ante profesionales de diferentes entidades públicas de la región y otros asistentes. Yo presenté el trabajo del equipo y terminé siendo una especie de maestro de ceremonias pasando el micrófono para preguntar o responder. Fue interesante y tuvo sus imprevistos, como cuando un ingeniero que trabaja en

una empresa que instala tecnología geotérmica (bombas de calor) aprovechó el micrófono abierto para hacer una presentación fuera del protocolo. En general, fue una excelente experiencia donde nos dimos a conocer en un círculo político y de tomadores de decisiones, a quienes pareció gustarles el trabajo hecho durante el primer año.

Para el segundo año de funcionamiento ya contábamos con el visto bueno de varias figuras políticas. Con Angello Negri, conocimos al consejero regional Julio Uribe durante el muestreo geoquímico del primer año y, desde entonces, Uribe apoyó el desarrollo de la geotermia en la región. El seremi de Energía, Juan Antonio Bijit, también veía con buenos ojos esta línea de desarrollo. Diría que nuestros “campeones políticos” fueron ellos dos junto a Ana Valdés.

5. Alineación de Actores en torno a Aysén Piloto Geotérmico

Los proyectos de geotermia que se han ido desarrollando en Aysén pueden ser analizados desde la perspectiva de alineación de la red de actores que han participado en ellos.¹⁹ Esta mirada permite explorar los intereses de los distintos participantes sin esperar que lleguen a un consenso, sino entendiendo que pueden alinearse en un objetivo común por razones diversas, que responden a los propios intereses e historias de cada cual. Un proyecto puede proveer un espacio de encuentro donde cada actor se compromete para satisfacer sus propios intereses. En el caso de los proyectos de geotermia en Aysén en los que ha participado el CEGA, se observa el involucramiento creciente de actores locales a lo largo del tiempo.

La experiencia de Aysén invita a observar una alineación de actores en torno al desarrollo de la geotermia, donde aparecen instituciones del gobierno local que tienen roles clave en la realización de los proyectos. Esto se ve reflejado en que todos los proyectos han contado con financiamiento regional, por una parte, está el financiamiento público para conocer el potencial de la región, que permite ejercer la soberanía estratégica sobre los recursos del territorio, y por otra, la demanda pública de tecnologías emergentes que ha probado ser un factor determinante para el desarrollo de innovaciones en su etapa temprana.²⁰ Los actores públicos han cumplido el rol de pioneros, asumiendo el riesgo de innovar para solucionar problemas sociales complejos, como es el reemplazo de la calefacción a leña en la región y la reinserción social, ambas metas explícitas de la política pública. Este rol de Estado emprendedor²¹ ha permitido que la región cuente con experiencias demostrativas que dan espacio para la experimen-

¹⁹ Nick von Tunzelmann, “Alignment, Misalignment and Dynamic Network-Based Capabilities”, en *Network Dynamics in Emerging Regions of Europe*. ed. D.A. Dyker. (Londres: Imperial College Press, 2009), pp. 3–22.

²⁰ Elvira Uyarra et al. “Public procurement, innovation and industrial policy: Rationales, roles, capabilities and implementation”. *Research Policy* (febrero, 2020)

²¹ Mariana Mazzucato. *The Entrepreneurial State - Debunking Public vs. Private Sector Myths*. (Londres: Anthem Press, 2013).

tación y el desarrollo de capacidades locales. Este efecto es posible cuando es del interés de los actores compartir sus experiencias, más allá de una estrategia de difusión comercial. En este espíritu, el Gobierno Regional invitó a una delegación de la Región de Los Ríos a conocer las experiencias en geotermia. La visita inspiró los proyectos que luego comenzó a desarrollar el Gobierno de los Ríos, donde a 2022 ya hay cuatro proyectos geotérmicos funcionando o en proceso de desarrollo; tres invernaderos y, durante el 2022, una posta rural.

La experiencia muestra también un incipiente proceso de acumulación de capacidades. En el trabajo realizado a lo largo de los años se ha establecido relación con profesionales locales. El ingeniero mecánico Tobías Hellwig, que había llegado recientemente a la región con la intención de arraigarse junto a su familia con un emprendimiento de servicios de climatización, conoció de los trabajos del CEGA y se fue integrando al equipo en los proyectos que vinieron. De manera similar, se estableció una relación con el antropólogo patagón Juan Sáenz, que se fue involucrando en los procesos de acompañamiento de proyectos y trabajo con las comunidades.

Si bien el caso de Aysén nos muestra que se puede, las capacidades locales no necesariamente se desarrollan. Hay ejemplos en el mundo de cambio tecnológico producido por enclaves extranjeros, entre los más recientes está el caso de la integración de los países de Europa del Este a la economía global de mercado.²² Hay mucho más que se podría hacer para fomentar la acumulación de capacidades para el aprovechamiento de la energía geotérmica en la región, y esto incluye las capacidades de las y los usuarios y el cambio de sus prácticas sociales en torno al confort térmico.

Estas experiencias, que involucraron actores movidos por intereses que les hacían privilegiar la apertura, muestran algunos atisbos de desarrollo de capacidades locales.

La experiencia en Aysén transformó la manera de trabajar del CEGA. En los nuevos proyectos se han usado de manera explícita mapas de ruta y otras herramientas que tienen como objetivo identificar e involucrar diversos actores en torno a los proyectos. Se va perfilando así la alineación de actores como una estrategia de trabajo, con mayor planificación de la integración de actores intersectoriales. Esto ha tenido también repercusiones internas en el CEGA, en la incorporación de nuevos perfiles profesionales y decisiones como usar el lema “CEGA para la sociedad”, reforzando el discurso que ya se tenía sobre que la geotermia tiene un rol social.

²² Slavo Radosevic, “Techno-Economic Transformation in Eastern Europe and the former Soviet Union – A Neo-Schumpeterian Perspective”. *Research Policy* (enero, 2022).



Figura 14. Visita de la delegación de Los Ríos al CET Valle Verde. Fuente: Archivo CEGA.

5.1. Aprendiendo de Aysén

La región cuenta con un entramado institucional, principalmente de organizaciones del Estado, que tienen como tarea implementar el plan de desarrollo y de abastecimiento energético. Estos actores valoran el rol que pueden tener proyectos demostrativos en los procesos de cambio tecnológico y cambio de prácticas sociales en la región. A lo largo del tiempo se fueron alineando actores en torno a la idea de “Aysén, piloto geotérmico”, logrando formar una masa crítica que hizo viable el desarrollo de proyectos demostrativos que se convirtieron en emblemáticos de la geotermia como una solución factible para la región. La alineación se dio entre actores con motivos diferentes y resultó particularmente fructífera cuando hubo perseverancia. El mantenerse en el tiempo permitió acumular capacidades y aprendizajes, que son una condición para que existan nuevos proyectos. Las motivaciones de algunos actores cambiaron en el tiempo, se armaron nuevas alianzas y se reforzaron creencias en torno a la geotermia para la región. Tanto la definición de una misión como el desarrollo de capacidades son incipientes, los destacamos como una orientación en la que podría profundizarse a partir de los avances que, aunque modestos, son una base para proyectar el futuro.

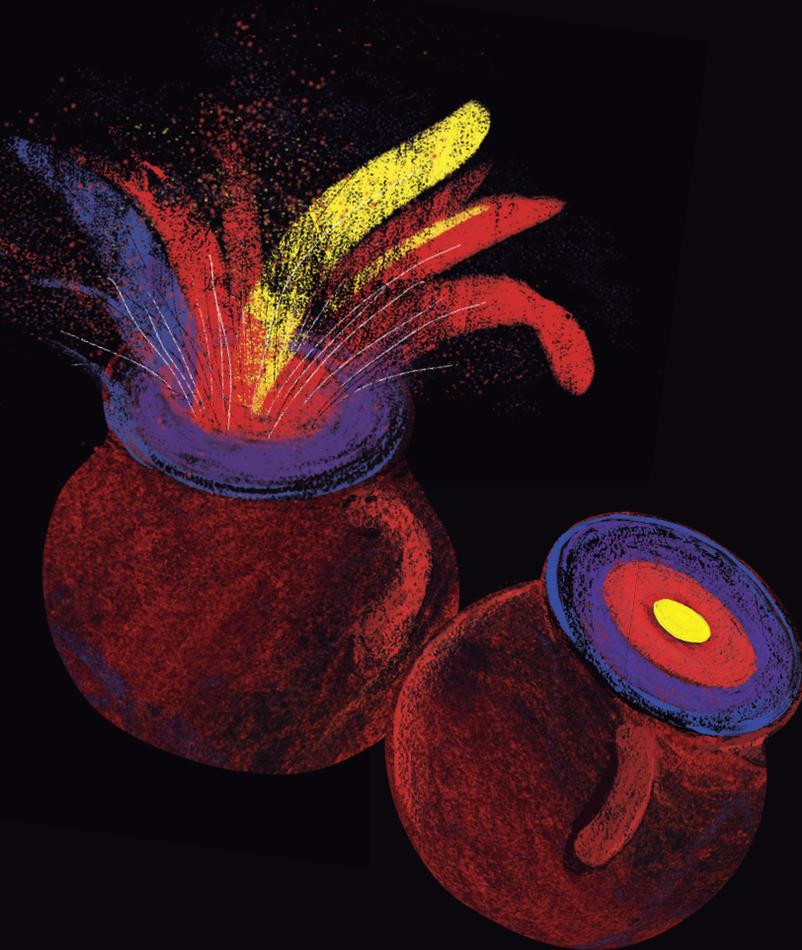
El CEGA ha sido parte de los actores involucrados en el proceso, con sus motivaciones evidentes de promover el desarrollo de la geotermia en el país, y ha sido uno de los actores perseverantes. Durante su trabajo en la región fue hilando una relación que ha sido significativa para sus propias decisiones estratégicas, más allá de Aysén. Los aprendizajes a los que dio lugar esta relación fueron dando forma a la estrategia de proyectos que el CEGA fue haciendo explícita a lo largo de los años. El involucramiento

con Aysén fue para el CEGA una experiencia exitosa. En retrospectiva, el involucramiento en la región respondió a una aproximación que primero fue intuitiva y, con el tiempo, se convirtió en una estrategia intencionada, fortalecida con la integración del área Geotermia y Sociedad que se creó casi junto con el término del estudio de exploración del potencial de la región en 2016. Esta estrategia ha llegado a ser una forma de trabajo formal del CEGA en nuevos proyectos en otras regiones y se basa en tres pilares aprendidos en la experiencia con Aysén: ganar la confianza de los actores locales, hacer ciencia con foco en la acción y conectar a la academia con las necesidades locales.

Ganar la confianza de los actores locales se ha basado en las formas de trabajar. La exploración geotérmica en el norte del país para uso eléctrico ha demostrado que se generan desconfianzas cuando el equipo que va al territorio no dedica atención a su rol fundamental en producir el primer encuentro entre la geotermia y la comunidad local. Esa relación es generalmente tensa, el equipo científico no toma un rol de comunicación. El trabajo de exploración del CEGA en la Región de Aysén en sus inicios no fue una estrategia planeada y se dio de manera intuitiva. Los primeros encuentros se dieron con un equipo versátil, formado por profesionales jóvenes y motivados, con más tiempo para dedicar a la difusión que el que se esperaría de una consultoría comercial y, además, sin la presión de completar artículos académicos como prioridad. Las confianzas permiten ir sumando actores que se alienan con los proyectos geotérmicos, y también construir sobre los aprendizajes y las experiencias.

Fue así como los proyectos demostrativos permitieron mostrar la “ciencia en acción”. El prototipo aplicado en base al diseño de un estudiante, en su memoria, es suficiente para pasar a la etapa de aplicación directa. Finalmente, el vincular las prioridades de la academia con las necesidades locales implica destinar tiempo para la acción y postergar las publicaciones científicas. Implica generar espacios de diálogo e instancias para conectarse con las necesidades locales, los ritmos de los procesos locales necesitan de dedicación y paciencia.

Cada sistema regional de innovación es distinto en cuanto al contexto, institucionalidad, cultura, dinámicas temporales y personas clave. La replicabilidad de los proyectos no ha sido fácil en esta experiencia, pero al menos se ha mantenido la actividad en el tiempo. A partir del trabajo de exploración de 2015, cada año se ha expandido la presencia de la geotermia en la región. En 2021 se suma la calefacción de la escuela de Puerto Cisnes y también se iniciaron nuevos proyectos en la Región de los Ríos inspirados en los proyectos en Aysén.



CONCLUSIONES

Hay calor, hay talento y tecnologías para aprovecharlo,
¿falta acaso la voluntad?

CONCLUSIONES

Hay calor, hay talento y tecnologías para aprovecharlo, ¿falta acaso la voluntad?

Cecilia Ibarra, Sofía Vargas Payera y Diego Morata

Los contenidos de este libro describen parte de la experiencia de once años de trabajo del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), siendo un esfuerzo de reflexión retrospectiva que dio lugar a nuevas conversaciones y espacios. En esta sección, a modo de cierre, nos centramos en los aprendizajes que nos deja la revisión de los tres ejes que orientaron este trabajo: la fuente, que está en el calor de la Tierra; la oportunidad, que vemos en la disponibilidad de tecnologías y capacidades; y la voluntad de aprovechar las oportunidades de usar el calor de la Tierra para lograr soberanía energética y la transición justa hacia modos de vida sustentables.

La Fuente: el recurso geotérmico soberano y la responsabilidad del Estado

El potencial geotérmico de Chile es inmenso, ilimitado. Aprovecharlo depende de cuánto se quiera invertir y de cuán profundo se decida perforar. Esto es un simple hecho donde no hay exageración. El asunto es conocer el potencial geotérmico a lo largo y ancho del territorio para tomar decisiones informadas respecto de las posibilidades de uso y las necesidades de inversión.

La energía disponible en nuestro territorio depende de la temperatura que tenga el reservorio geotermal. De este modo, hemos visto que si esta temperatura es superior a los 150°C se habla de sistemas de alta entalpía. Cuando la temperatura del reservorio está entre los 150° y 90°C se define como un sistema de media entalpía, y se trata de un sistema de baja entalpía cuando la temperatura está entre los 90° y 30°C. Es de muy baja entalpía si la temperatura es inferior a los 30°C. Lo importante es que en todos los casos el calor puede ser aprovechado como fuente de energía para generación de electricidad o usos domésticos y productivos. Chile tiene reservorios geotermales inexplorados y calor subterráneo democráticamente distribuido en todo su territorio. Es posible aprovechar este calor de la Tierra, en su diversidad de condiciones de potencial geotérmico, gracias a que existen tecnologías apropiadas para cada caso según los usos que se quieran satisfacer.

En este contexto, el primer paso es conocer el bien geotérmico, sus dimensiones, su naturaleza y su potencialidad para ser sustentablemente utilizado y eso, sin dudas, requiere destinar recursos. En Chile existen profesionales capaces de hacer el trabajo necesario para determinar las características de las fuentes de geotermia y, de acuerdo a éstas, las posibilidades de uso más apropiadas. Hay algunos estudios que pueden servir de base al trabajo exploratorio, no obstante, se necesita de un mapeo en terreno para determinar la factibilidad y para poder costear las inversiones en soluciones tecnológicas con geotermia. Chile requiere contar con planes regionales geotérmicos, los que se alineen con las principales necesidades energéticas de los territorios.

En esta labor de conocer el bien geotérmico hay una responsabilidad del Estado, puesto que no sería posible tomar decisiones sin información básica. Hay que poner el punto de mira en una toma de decisiones basada en la evidencia. Decisiones respecto de inversión pública, fomento a la inversión privada, acuerdos público-privados o necesidades de regulación, necesitan de conocimiento respecto del recurso. Siguiendo las recomendaciones de las Naciones Unidas, los estados tienen derechos soberanos sobre sus bienes naturales y tienen también deberes para su cuidado. Para ejercer esos derechos y deberes, el primer paso es saber cuáles son esos bienes. Sin un conocimiento profundo de lo que un Estado tiene, es imposible tomar decisiones sobre cómo se quiere desarrollar ese recurso energético que hay en el subsuelo.

En este sentido el rol de los estados en cuanto a la soberanía sobre los bienes naturales se relaciona directamente con la sustentabilidad, que implica considerar la satisfacción de necesidades sociales del presente y también las necesidades de las generaciones futuras. Las Naciones Unidas, por ejemplo, en el Reporte Brundtland,¹ establece que el desarrollo sustentable incluye elementos de prudencia, equidad intergeneracional, responsabilidad y gobernanza. La prudencia se refiere al deber de los estados de asegurar el uso sustentable de sus bienes naturales. Esto significa que los estados tienen derechos soberanos sobre sus bienes naturales y tienen también el deber de no dilapidarlos demasiado rápido, causando daños indebidos a estados más allá de su jurisdicción.

El desarrollo de la geotermia necesita de información geológica detallada y confiable que pueda ser la base para el aprovechamiento del calor disponible en todo el territorio nacional. Para los inversionistas privados la falta de esta información puede convertirse en una barrera de entrada, que aumenta los riesgos y que implica costos de inversión que no se justifican para un proyecto privado. La ciudadanía, por su parte, necesita confiar en que el Estado cuida y es garante de los bienes soberanos.

¹ Organización de las Naciones Unidas. Informe Brundtland. Nueva York, 1987.

El calor de la Tierra está situado en un territorio, es indisoluble con éste y forma el paisaje. Es indispensable conocer este recurso, del que hoy faltan mapas y estudios que se alineen a las necesidades energéticas territoriales. A lo largo del tiempo, la manera de entender y de conocer la energía geotérmica ha cambiado, desde las ilustraciones de los naturalistas hasta las estimaciones de potencial y el monitoreo de reservorios. La tarea de mantener información actualizada es una labor y una responsabilidad permanente.

La Oportunidad: capacidades acumuladas y dinámicas

La ciencia y la tecnología geotérmicas están disponibles en Chile y esto ha tomado tiempo. En el país hoy hay muestras de aplicaciones diversas de las posibilidades de la geotermia, desde la producción de electricidad en Cerro Pabellón hasta la climatización de ambientes en zonas aisladas. El uso directo y la geotermia somera ofrecen una panorámica de posibilidades con beneficios evidentes para los territorios donde se aproveche un elemento que está disponible y donde hoy hay serios problemas de dependencia de combustibles fósiles y de leña, como en la Región de Aysén. La formación de profesionales incluye no solo docencia formal en aulas y laboratorios, sino también el aprendizaje en la experiencia práctica, en exploraciones en terreno y en proyectos de innovación, con tecnologías que no se han aplicado en el país, como por ejemplo, calefaccionar un invernadero usando fuentes termales en Liquiñe (Región de los Ríos) o calefaccionar una escuela usando bombas de calor geotérmicas en Coyhaique y Curacautín. Como es común en los procesos de aprendizaje, la curva es más empinada al principio, cuando todo es nuevo, no hay una masa crítica y las redes están incompletas. Entre otras cosas, hay que encontrar proveedores, acercarse a la tecnología, aprender a trabajar con las comunidades y formar técnicos para que puedan dar servicios de mantención.

El fomento al desarrollo de las energías renovables ha fluctuado con los precios del petróleo, si éste baja, las políticas públicas dejan de priorizar las energías renovables. Así fue con la energía solar en Chile, donde el desarrollo logrado en la década de altos precios de los combustibles fósiles se estancó en los años 90, con lo que se perdieron capacidades tecnológicas, de innovación y desarrollo.² En los 2000 hubo que empezar de nuevo, y recién ahora se está valorando lo que había antes de los años de vacío. Los países que lograron liderazgo solar apoyaron a la industria emergente en los años 90, cuando no era competitiva según las leyes del mercado, siendo justamente eso lo que promovemos pase con la geotermia.

² Mauricio Osses, Cecilia Ibarra, y Bárbara Silva. *El Sol al Servicio de la Humanidad. Historia de la Energía Solar en Chile* (Santiago: RIL Editores, 2019).

La energía geotérmica está aún en una etapa emergente en Chile y esto significa que las evaluaciones de proyectos privados, e incluso las que se usan para la inversión pública en el Sistema Nacional de Inversiones, y que se ciñen al análisis de costos y beneficios económicos, no permiten tomar decisiones que se hagan cargo de esta etapa del desarrollo de la tecnología.

En este siglo, se han acumulado capacidades para el aprovechamiento de la energía geotérmica en Chile: hay profesionales y hay tecnologías disponibles. Por supuesto quedan desafíos pendientes por desarrollar y retos por analizar dentro de los tópicos de investigación que se desarrollan en el CEGA, como es el caso del modelamiento y monitoreo de reservorios. Las capacidades científicas y técnicas hoy día ya instaladas son parte de una industria incipiente en el país. Ahora bien, si estas capacidades no se usan de manera sistemática, si se diluyen en el tiempo, se perderán, ya que son dinámicas y necesitan seguir desarrollándose, especialmente cuando, para este ciclo inicial en el que se encuentra la industria geotérmica chilena, las capacidades necesarias son más sofisticadas y complejas.

La Voluntad: una nueva narrativa geotérmica

Estamos en un punto en la historia que demanda cuestionamientos y nuevos horizontes. Muchas de las ideas, de las formas de actuar tradicionales, están siendo revisadas por una nueva sociedad, por un nuevo Chile que piensa y proyecta un país diferente. En este marco, proponemos una nueva narrativa para la geotermia, proponemos que el calor de la Tierra esté al servicio de los territorios y de sus principales necesidades, y que sea una aliada —a través de sus usos directos— en la disminución de la contaminación atmosférica del sur del país, así como de la pobreza energética de sus comunidades.

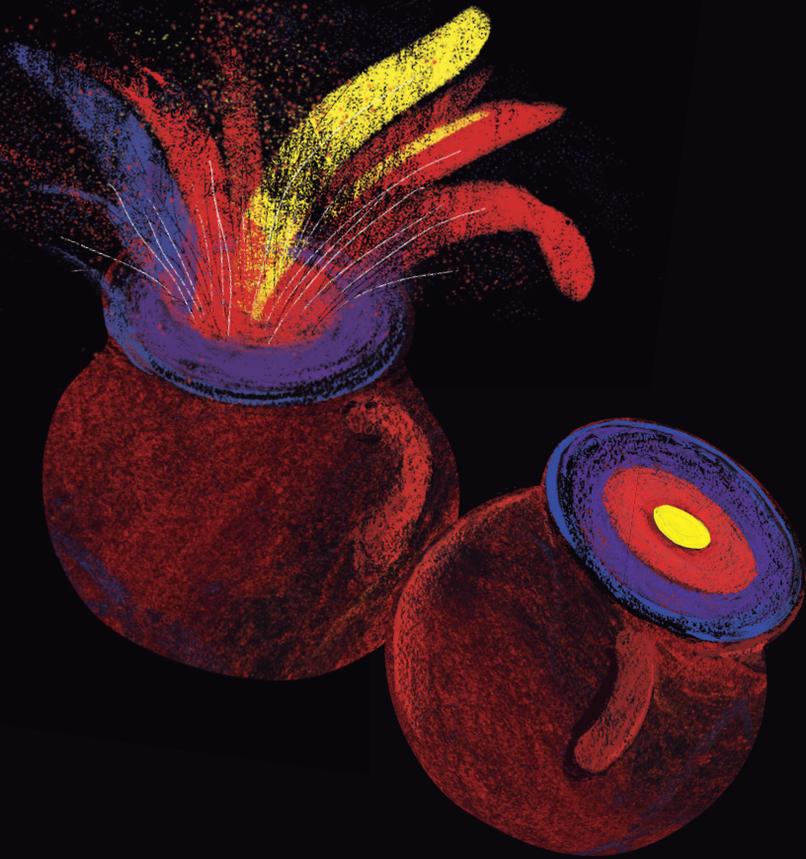
La geotermia tiene características democráticas, está bajo nuestros pies a lo largo de todo el territorio nacional, por ello, puede ser usada para fortalecer la resiliencia de sus comunidades. Proponemos replantearse el cómo se usa la geotermia en Chile, donde todavía sigue existiendo desconfianza sobre su uso. Soñamos con un país donde coexistan plantas pequeñas de geotermia, las que puedan mejorar y entregar seguridad energética en zonas aisladas, fortaleciendo la resiliencia de sus sistemas eléctricos y que, gracias a su alto factor de planta, sean la base que sustente la seguridad de la matriz energética. Sin lugar a dudas, postulamos que la geotermia tiene que estar al servicio de la transición energética justa que se requiere y se demanda hoy.

Cierre

Este libro es un legado del CEGA a la comunidad de profesionales, técnicos(as), investigadores, trabajadores, promotores y usuarias(os) de la geotermia chilena. Para quienes ya forman parte de esta comunidad y quienes se acercan a ella, especialmente las y los estudiantes de pregrado que toman la decisión de hacer una práctica o una tesis y eligen enrolarse en la legión geotérmica. También para los ambientalistas y quienes impulsan políticas públicas y para todas aquellas personas que valoran y cuidan la energía de la Tierra y quienes se integrarán a esta comunidad.

Lo que se ha recopilado en los capítulos de este libro es una muestra de aspectos de la historia de la geotermia en Chile, de lo que tenemos como país y que debería ser valorado. Hoy Chile cuenta con docencia establecida, una industria emergente y una institucionalidad en formación. En momentos de crisis ambiental, social y climática, como la que vivimos hoy, se pone en evidencia lo que es valioso y lo que es superfluo. En el nuevo orden que tomen las cosas queremos asegurar un lugar para la geotermia, como energía limpia y soberana en su territorio.

Somos unos convencidos que el CEGA tiene un lugar en esta historia, a veces como protagonista, otras como facilitador, otras veces atando hilos y armando relaciones entre instituciones, poniendo una semilla o dando aliento. Esa labor continúa con este libro que muestra cuánto ha costado lograr lo que tenemos, los largos procesos involucrados y los aprendizajes, con la esperanza de despertar la conciencia respecto del cuidado, porque construir y acumular capacidades toma décadas de esfuerzo y perderlas solo toma unos años de abandono.



BIOGRAFÍAS Y REFERENCIAS

Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA).

Es un proyecto Fondep-ANID que inició sus operaciones durante el primer semestre de 2011 y, desde entonces, ha liderado la investigación en geotermia en Chile. Está integrado por un equipo de investigadores de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, junto a científicas y científicos de la Pontificia Universidad Católica de Chile y otras instituciones internacionales. Sus principales cinco líneas de investigación – fuente de calor; geoquímica de fluidos e isotópica; interacción calor, fluido y roca, geología estructural, tectónica y geofísica; y modelamiento y arquitectura de reservorios– buscan describir el recurso geotérmico del país para promover su uso de forma sostenible y amigable con el medioambiente. En 2015, el CEGA sumó el área de Proyectos de Uso Directo de Geotermia, unidad que promueve y desarrolla proyectos demostrativos de uso somero de esta energía en el país, así como el área Geotermia y Sociedad, fundada en 2016, que integra la mirada social y cultural en los proyectos aplicados y de investigación del CEGA.

Editores

Cecilia Ibarra

Investigadora adjunta del CEGA desde 2019 en la línea de Geotermia y Sociedad. Su área de especialización es la política científica y tecnológica (Phd, Universidad de Sussex), se ha dedicado a investigar procesos de desarrollo tecnológico en Chile desde una perspectiva histórica. Su área de interés está en las ciencias, las tecnologías y las capacidades que posibiliten una transformación justa y sostenible para la adaptación y contención del cambio climático.

Sofía Vargas Payera

Investigadora social con formación en comunicación. Magister en comunicación de riesgos (Simon Fraser University, Canadá) e investigadora doctoral en Transdisciplina en ETH, Zurich, Suiza. Formó el área Geotermia y Sociedad del CEGA en 2016, unidad que coordinó hasta 2020. En ese cargo fue responsable de cooperaciones nacionales e internacionales, además de implementar proyectos aplicados y de investigación sobre geotermia. Actualmente trabaja en la interfaz ciencia, energía y sociedad, y es autora de libros socio-científicos para niños y niñas.

Diego Morata

Geólogo y doctor en Ciencias Geológicas de la Universidad de Granada, profesor titular del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Director y fundador del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA). Sus áreas de especialización son petrología y geoquímica.

Autores en orden alfabético

Diego Aravena

Geólogo y MSc en Ciencias de la Universidad de Chile. Investigador CEGA con experiencia en exploración geoquímica, evaluación de potencial geotermal de alta entalpía y evaluación de potencial termogeológico e hidrogeológico para proyectos de geotermia somera. Actualmente lidera y participa en proyectos de implementación de geotermia somera en escuelas, invernaderos y procesos productivos; tanto con bomba de calor geotérmica como mediante el uso de fuentes termales.

María José Correa Gómez

PhD en Historia de la Medicina de la University College de Londres (UCL). Actualmente es académica del Departamento de Humanidades de la Universidad Andrés Bello. Sus investigaciones han contado con el apoyo de Wellcome Trust, Bakken Museum y Fondecyt, se han enfocado en el estudio de las enfermedades mentales y nerviosas, además de las terapias médicas, como la electroterapia y el termalismo, durante el siglo XIX e inicios del XX. Actualmente se encuentra realizando un proyecto sobre calidad alimentaria en Chile durante la temprana modernidad.

Luz María Fariña Rivas

Periodista especializada en Comunicación de la Ciencia y magíster en Psicología Social de la Universidad de Chile. Es relatora del Diplomado en Comunicación Científica de la Facultad de Ciencias de la U. de Chile. Trabajó cuatro años en el área de comunicaciones del CEGA, dando énfasis al posicionamiento en prensa regional de los proyectos de uso directo de la geotermia ejecutados por el FONDAP. Además, estuvo a cargo de proyectos de Ciencia Pública donde se difundieron temas de geología, vulcanología y geotermia para públicos no expertos. Actualmente es directora de Comunicaciones de la Universidad de O'Higgins.

Martín Fonck

Investigador asociado del Institute of Advanced Studies in Sustainability en Potsdam, Alemania. Realizó sus estudios de doctorado en Rachel Carson Center in Environment and Society y el Instituto de Antropología Social y Cultural de la Universidad de Múnich. Su principal tema de investigación son las narrativas e imaginarios ambientales, con un especial interés en la cordillera de los Andes. Actualmente, se encuentra escribiendo sobre laboratorios naturales y los futuros de la energía geotérmica en los Andes chilenos, basado en su proyecto de doctorado. Este último contó con el apoyo del CEGA durante el trabajo de campo, donde también colaboró en el análisis de fuentes históricas de la energía geotérmica en Chile.

Martín también investiga, junto al grupo del IASS Planetary Geopolitics and Geoengineering, la legitimidad y los efectos inesperados de nuevas tecnologías para enfrentar el cambio climático.

Nicolás Hurtado Arroyo

Ingeniero civil mecánico, con cinco años de experiencia en el dimensionamiento de sistemas de climatización geotérmicos, estudios de factibilidad y la coordinación de trabajos para la implementación de proyectos con uso directo de la geotermia. A través del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) ha trabajado para gobiernos regionales, el Ministerio de Energía, la Sociedad Alemana de Cooperación Internacional (GIZ), las Naciones Unidas y el Banco Mundial.

Esteban Micco

Ingeniero civil industrial, con tres años de experiencia en el diseño de modelo de negocios, evaluación socioeconómica de proyectos y evaluación multicriterio de proyectos de uso directo de geotermia, tanto de carácter productivo como de climatización. A través del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) ha trabajado para la Sociedad Alemana de Cooperación Internacional (GIZ), el Ministerio de Energía, gobiernos regionales y municipalidades en la zona sur del país

Mauricio Muñoz Morales

Geólogo y magister en Ciencias, mención Geología, con diez años de experiencia en la prospección de recursos geotérmicos, estudios de factibilidad y elaboración de hojas de ruta para el desarrollo del uso directo de geotermia, además de la coordinación técnica de la construcción de proyectos del uso directo de la geotermia. A través del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) ha trabajado para gobiernos regionales, el Ministerio de Energía, la Sociedad Alemana de Cooperación Internacional (GIZ), el CTCN de las Naciones Unidas, la Agencia Chilena de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AGECID) y el Banco Mundial

Ignacio Ortega

Ilustrador, autor y docente. Comunicador social de la Universidad de Santiago, cursó el Diplomado de Ilustración y Narración Gráfica de la Pontificia Universidad Católica. Publicó su primer libro *Lirio, un revés un derecho* editado por Santillana Infantil y Juvenil, con el que ganó la medalla de oro Colibrí IBBY 2017 como mejor Libro Álbum. Ha publicado con las editoriales nacionales Planeta de Libros y Santillana, y colaborado para *Harper's Bazaar Corea*, Ministerio del Trabajo, OIT y Fundación para la Superación de la Pobreza, entre otros. Se ha desempeñado en el ámbito

docente en la Escuela de Publicidad e Imagen de la Universidad de Santiago y la Escuela de Diseño de la Universidad de Chile.

Sofía Otero Cavada

Estudió periodismo en la Universidad de Chile y un Magíster en Comunicación de la Ciencia en la Universidad de Otago (Nueva Zelanda). Se dedica a la divulgación de las ciencias hace casi 15 años, con énfasis en la escritura. Durante casi diez años se desempeñó como encargada de divulgación del CEGA, siendo responsable del plan de comunicaciones y del desarrollo de materiales y actividades de difusión. Ha publicado libros informativos y un álbum sobre geología, astronomía y energías renovables. También ha desarrollado contenido para exposiciones, productos audiovisuales y realiza talleres y clases sobre comunicación de la ciencia.

Philippe Robidoux

Geólogo de recursos, magíster profesional en SIG (Université du Québec à Montréal, Canada), magíster en Ciencias de la Tierra (Universidad Nacional Autónoma de México, México) y Doctor en “Ciencias de la Tierra y del Mar” (Università degli studi di Palermo, Italia). Investigador CEGA y docente en la Universidad de Chile con experiencia en petrología ígnea, volcanología, sistemas de información geográfica, exploración mineral y geoquímica.

Juan Sáenz

Antropólogo social de la Universidad de Chile, vive y trabaja en la Región de Aysén, donde ha participado en gestión de proyectos comunitarios. Actualmente es coordinador del programa Recuperación de Barrios de la Municipalidad de Coyhaique. Colaboró en el área Geotermia y Sociedad del CEGA entre 2017 y 2020, realizando acompañamientos etnográficos con las comunidades donde se desarrollaron los proyectos demostrativos de uso directo de geotermia, y apoyó mediciones de pobreza energética en Puyuhuapi, Cisnes.

Miguel Saldivia

Abogado y periodista (Universidad de Chile), magister en Derecho Ambiental (University College London) y candidato a doctor en regulación de energías renovables en América Latina (University of Cambridge). Investigador del Cambridge Centre for Environment, Energy and Natural Resource Governance (CEENRG), en Reino Unido, y del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), en Chile. Miembro del Centre for International Sustainable Development Law (CISDL). Académico y consultor en temas de energía, medio ambiente y cambio climático.

Catalina Valdés

Doctora en historia del arte, trabaja como docente, curadora e investigadora independiente. Explora a través de su trabajo la intersección entre historia del arte e historia de las ciencias naturales, enfocándose principalmente en la cultura visual y material de Chile y Latinoamérica desde el siglo XIX hasta la contemporaneidad. Sus principales objetos de estudio son las representaciones visuales de la naturaleza, las que aborda tanto desde su dimensión material como en sus alcances artísticos y socioambientales.

Diagramación

M. Giselle Ogaz, diseñadora gráfica con amplia experiencia en comunicación de la ciencia.

Edición de textos

Cristina Espinoza Calderón, periodista especializada en comunicación de la ciencia.

Referencias

- Adams, Paul. 2011. *Grouped: How small groups of friends are the key to influence on the social web*. Berkeley: New Riders.
- Agencia Chilena de Eficiencia Energética. Ver_Noticias, 22 de julio de 2009. Gobierno convertirá a La Moneda en un edificio eficiente y sustentable para el Bicentenario. Fuente: <http://old.acee.cl/577/article-58503.html> (consultada el 01 de septiembre 2020).
- Aguirre Le Bert, Luis, Reynaldo Charrier, John Davidson, Constantino Mpodozis, Sergio Rivano, Ricardo Thiele, Enrique Tidy, Mario Vergara y Jean Claude Vicente. 1974. Andean Magmatism; its paleogeographic and structural setting in the central part (30°–35° S) of the Southern Andes. *Pacific Geology* 8 (1): 38.
- Aravena, Diego, Mauricio Muñoz, Diego Morata, Alfredo Lahsen, Miguel Ángel Parada y Patrick Dobson. 2016. Assessment of high enthalpy geothermal resources and promising areas of Chile. *Geothermics* 59: 1-13.
- Aravena, Diego, Mauricio Muñoz, Pablo Valdenegro, Linda Daniele y Diego Morata. 2021. Estimating Low-Enthalpy Geothermal Energy Potential in Four Cities of Southern Chile: A Battle against Particulate Material Pollution. En Proceedings World Geothermal Congress 2020+1, abril - octubre, Reykjavik, Islandia.
- Aravena, Diego, Nicolás Pérez Estay, Sofía Otero y Mauricio Muñoz. 2016. “Geothermal exploration in the Aysén region, Chilean Patagonia”. En 38th New Zealand Geothermal Workshop, 23-25 de noviembre, en Auckland, Nueva Zelanda.
- Aravena, Diego, Nicolás Pérez, Mauricio Muñoz y Karin García. 2020. “Gravity, Transient Electro-Magnetic and Noise Seismic Exploration in the Puyuhuapi Geothermal Area, Southern Patagonia, Chile”. En World Geothermal Congress, 26 de abril-2 de mayo, en Reykjavik, Islandia.
- Aravena, Diego, Ignacio Villalón y Pablo Sánchez. 2015. Igneous related geothermal resource in the Chilean Andes. En Proceedings World Geothermal Congress, Melbourne, Australia.
- Ariztía, Tomás, Álex Boso y Manuel Tironi. 2017. Sociologías de la energía. Hacia una agenda de investigación. *Revista Internacional de Sociología* 75.
- Astudillo-Sotomayor, Luis, Julius Jara-Muñoz, Daniel Melnick, Joaquín Cortés-Aranda, Andrés Tassara y Manfred Strecker. 2021. Fast Holocene slip and localized strain along the Liquiñe-Ofqui strike-slip fault system, Chile. *Scientific reports* 11(1): 1-10.
- Banks, David. 2012. *An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling*. Chichester, Reino Unido: John Wiley & Sons.
- Baccarin, Francesco, Gianni Volpi, Germain Rivera, Nadia Giorgi, Alessia Arias, Geoffrey Giudetti, Maurizio Cei, Marco Cecioni, Lisandro Rojas y Carlos Ramírez. 2020. “Cerro Pabellón Geothermal Field (Chile): Geoscientific Feature and 3D Geothermal Model”. Presentado en World Geothermal Congress 10, Reykjavik,

- Islandia, 24-27 de octubre.
- Barandiarán, Javiera. 2018. *Science and Environment in Chile. The politics of expert advice in a neoliberal democracy*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Baños de Cauquenes. *El Ferrocarril*. 13 de diciembre de 1864.
- Bermúdez, Jorge y Dominique Hervé. 2017. La jurisprudencia ambiental reciente: tendencia al reconocimiento de principios y garantismo con los pueblos indígenas. *Anuario de Derecho Público*. Santiago: UDP, 251.
- Bertani, Ruggero. 2012. Geothermal power generation in the world 2005-2010 update report. *Geothermics* 41: 1-29.
- Bertani, Ruggero. 2016. Geothermal power generation in the world 2010-2014 update report. *Geothermics* 60: 31-43.
- Besse, Jean Marc. 2000. *Voir la terre. Six essais sur le paysage et la géographie*. Arles: Actes Sud.
- Brasse, Heinrich, Pamela Lezaeta, Volker Rath, Katrin Schwalenberg, Wolfgang Soyer y Volker Haak. 2002. The Bolivian altiplano conductivity anomaly. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107 (B5): EPM-4.
- Bridenbaugh, Carl. 1946. Baths and Watering Places of Colonial America. *William and Mary Quarterly* 3 (abril).
- Brighanti, Plinio. 1946. Informe sobre la zona geotérmica del Tatio. Archivo de la Biblioteca del Sernameomin.
- Brüggen, Juan. 1940. Informe geológico sobre los géiseres Volcanes del Tatio. Ministerio de Fomento, Departamento de Minas y Petróleo. Informe inédito.
- Brüggen, Juan. 1942. Los geisers de los volcanes del Tatio. *Revista Chilena de Historia y Geografía* 93 (101): 236-259.
- Brüggen, Juan. 1947. El origen de las aguas minerales de Chile. *Revista Chilena de Historia y Geografía* 109.1: 189-226.
- Brüggen, Juan. 1948. Contribución a la geología de los volcanes y termas de Chillán. *Revista Chilena de Historia y Geografía* 111: 105-137.
- Burns, Terry W., D. Johnson O'Connor, y Susan Stockmayer. 2003. Science communication: a contemporary definition. *Public Understanding of Science*: 183-202.
- Cappetti, Guido, Nadia Giorgi, Alesia Aroas, Gianni Volpi, Germain Rivera, Maurizio Cei, Maurizio Fedeli, Giuseppe Di Marzio, Martino Pasti, Stefano Massei y Francesco Baccarin. 2020. The Cerro Pabellón Geothermal Project (Chile): from surface exploration to energy production. En *Proceedings World Geothermal Congress Reykjavic, Islandia, 2020+1*.
- Carmona Caldera, Cristóbal. 2017. The road less travelled: the duty to consult and the special rule of article 15.2 of ILO Convention 169 in the case of geothermal energy concessions in Chile. *Journal of energy & natural resources law* 35(4): 485-501.
- Cataldi, Raffaele. 1999. Social acceptance: a sine qua non for geothermal development in the 21st century. *Bulletin d'Hydrogéologie* 17:17.

- Cataldi, Raffaele, Susan F. Hodgson y John W. Lund. 1999. *Stories from a Heated Earth, Our Geothermal Heritage*. Sacramento, California: Geothermal Resources Council.
- Cataldi, Raffaele y Mario César Suárez-Arriaga. 2020. *History of Geothermal energy in the world, from its origins to the 20th century*. Pisa: Tipografía Editrice Pisana.
- CEGA. 2017. Informe proyecto Fondo de Innovación para la Competitividad (FIC): Estimación y valorización del potencial geotérmico en la Región de Aysén. Chile: CEGA.
- Cembrano, José, Francisco Hervé y Alain Lavenu. 1996. The Liquiñe-Ofqui fault zone: a long-lived intra-arc fault system in southern Chile. *Tectonophysics* 259 (1-3): 55-66.
- Charrier, Reynaldo. 1973. Interruptions of spreading and the compressive tectonic phases of the Meridional Andes. *Earth and Planetary Science Letters* 20 (2): 242-249.
- Charrier, Reynaldo et al. 2016. Contribución del Profesor Johannes Brüggén a la geología en Chile. En IV Congreso Argentino de Historia de la Geología - IV CAH-GEO, 15 y 16 de septiembre, La Plata.
- Chen, Yi-Wei, Jonny Wu y John Suppe. 2019. Southward propagation of Nazca subduction along the Andes. *Nature* 565 (7740): 441-447.
- Chmielowski, Josef, George Zandt y Christian Haberland. 1999. The central Andean Altiplano-Puna magma body. *Geophysical Research Letters* 26: 783-786.
- Chua, K.J., S.K. Chou y Wenming Yang. 2010. Advances in heat pump systems: A review. *Applied Energy* 87, no. 12 (julio): 3611-3624.
- Comisión Nacional de Energía. Balance Nacional de Energía 2019. Energía Abierta. <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/balance-de-energia/>
- Clavero, Jorge, Germán Pineda, C. Mayorga, Aldo Giavelli, Isabel Aguirre, Sherrie Simmons, Sebastián Martini, José Soffia, R. Arriaza, Edmundo Polanco y Luciano Achurra. 2011. Geological, geochemical, geophysical and first drilling data from Tinguiririca geothermal area, Central Chile. *Geothermal Resources Council Transaction* 35: 731-734.
- Cuadra, Pedro. 1868. Apuntes sobre la geografía física y política de Chile. *Anales Universidad de Chile*: 6i-226.
- Cuppen, Eefje, Olivier Ejderyan, Udo Pesch, Shannon Spruit, Elisabeth Van de Grift, Aad Correljé, Behnam Taebi. When controversies cascade: Analyzing the dynamics of public engagement and conflict in the Netherlands and Switzerland through 'controversy spillover'. *Energy Research & Social Science* 68.
- Darapsky, Ludwig. 1890. *Las aguas minerales de Chile*. Valparaíso.
- Daston, Lorraine. 1998. Fear and loathing of the imagination in science. *Daedalus* 127: 73-93.
- De Pascale, Gregory, Melanie Froude, Ivanna Penna, Reginald Hermanns, Sergio A. Sepúlveda, Daniel Moncada, Mario Persico, Gabriel Easton, Angelo Villalo-

- bos y Francisco Gutiérrez. 2021. Liquiñe-Ofqui's fast slipping intra-volcanic arc crustal faulting above the subducted Chile Ridge. *Scientific reports* 11 (1): 1-12.
- De Silva, S.L. 1989. Geochronology and stratigraphy of the ignimbrites from the 21 30' S to 23 30' S portion of the Central Andes of northern Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 37 (2): 93-131.
- Dietz, Robert S. 1961. Continent and ocean evolution by spreading of the sea-floor. *Nature* 190, 854-857.
- DiPippo, Ronald. 2012. Part 1. Resource Identification and Development. En *Geothermal Power Plants* (Third Edition), editado por Ronald DiPippo, 1-2. Boston: Butterworth-Heinemann.
- Domeyko, Ignacio. 1850. Viaje a las cordilleras de Talca y Chillan. *Anales Universidad de Chile*: 9-29 y 47-74.
- Domeyko, Ignacio. 1871. Hidrología. Estudio sobre las aguas minerales de Chile, por don Ignacio Domeyko, rector de la Universidad. *Anales de la Universidad de Chile*, tomo 39.
- Domeyko, Ignacio. 1903. Memoire sur la composition geologique du Chile a la latitude de Concepción, depuis la baie de Talcahuano jusqu'au sommet de la Cordillere de Pichachen, comprenant la description du volcán d'Antuco. Presentado en París en 1840 e integrado en castellano al tomo V de su obra *Jeología*. Santiago: Imprenta Cervantes.
- D'Orazio, Marilena, Samuel Agostini, Francesco Mazzarini, Fabrizio Innocenti, Piero Manetti, Miguel Haller y Alfredo Lahsen. 2000. The Pali Aike volcanic field, Patagonia: slab-window magmatism near the tip of South America. *Tectonophysics* 321 (4): 407-427.
- Dowd, Anne Maree, Naomi Boughen, Peta Ashworth y Simone Carr-Cornish. 2011. Geothermal technology in Australia: Investigating social acceptance. *Energy Policy* 39.
- ELC-Electroconsult. 1975. Exploitation of El Tatio Geothermal field, Northern Chile. Feasibility Report.
- Electric Power Research Institute (EPRI). 1978. Geothermal Energy Prospects for the Next 50 Years. *Preliminary Report to the Conservation Commission World Energy Conference* (febrero).
- Espejo, Primitivo. 1897. *Guía del Bañista y del Turista*. Santiago.
- Estrada Corona, Adrián. 2010. Meter la ciencia de contrabando, tarea del divulgador: Diego Golombek. *Revista Digital Universitaria Vol. 12* N°12 (diciembre). Universidad Autónoma de México, Ciudad de México.
- Etchegaray, María. 1937. Estudio físico-químico de las principales fuentes de las termas de Chillan. Tesis. Santiago.
- Ewing, Maurice y Frank Press. 1955. Geophysical contrasts between continents and ocean basins. En *Crust of the Earth: A Symposium*, editado por Arie Poldervaart. Nueva York: Geological Society of America.
- Ewing, Maurice y Bruce C. Heezen. 1956. Some problems of Antarctic submarine geology. En *Antarc-*

- tica in the International Geophysical Year: Based on a Symposium on the Antarctic, Volume 1*, editado por A.P. Crary, L.M. Gould, E.O. Hulburt, Hugh Odishaw y Waldo E. Smith. Massachusetts: American Geophysical Union.
- Fariña, Luz. 2020. "Entrevista a Carlos Jorquera, editor para América Latina de Piensa en Geotermia". Comunicaciones CEGA.
- Filippini, Angelo. 1953. Informe sobre la zona geotérmica del Tatio. Archivo de la Biblioteca del Sernameomin.
- Folchi, Mauricio, editor. 2019. *Chile despertó. Lecturas desde la Historia del estallido social de octubre*. Santiago: Universidad de Chile.
- Francek, Mark. 2013. A compilation and review of over 500 geoscience misconceptions. *International Journal of Science Education*: 31–64.
- Fridleifsson, Ingvar B. 2001. Geothermal Energy for the Benefit of the People. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 5 (3): 299–312.
- García Cruz, Cándido Manuel. 2004. *Teoría de la Tierra (1785, 1788) de James Hutton: Visión cíclica de un mundo cambiante, La Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*. España: Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, AEPECT.
- Gobierno de Chile. Ver_Chile's Nationally Determined Contribution (NDC). https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Chile%20First/Chile%27s_NDC_2020_english.pdf
- Godoy, Benigno, Marco Taussi, Osvaldo González-Maurel, Darío Hübner, James Lister, Daniel Sellés, Petrus Le Roux, Alberto Renzulli, Germain Rivera y Diego Morata. 2022. Evolution of the Azufre volcano (northern Chile): implications for the Cerro Pabellón Geothermal Field as inferred from long-lasting eruptive activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 423: 107472.
- Godoy, Estanislao. 1981. Sobre la discordancia intrasenoniana y el origen de los depósitos de caolín de Montenegro, Región Metropolitana, Chile. En Congreso Geológico Argentino 8, 20-26 septiembre, en San Luis.
- Goff, Fraser y Cathy Janik. 2000. Geothermal Systems. En *Encyclopedia of Volcanoes*, editada por H. Sigurdsson, B. Houghton, S. McNutt, H. Rymer, and J. Stix, First, 817–34. San Diego: Academic Press.
- González Ferrán, Óscar y Mario Martínez. 1962. Reconocimiento geológico de la Cordillera de los Andes entre los paralelos 35 y 38 sur. *Anales de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Vol. 19*, No. 19 (agosto): 19.
- Gould, Stephen Jay. 1996. *Time's arrow, time's cycle: myth and metaphor in the discovery of geological time*. Cambridge-London: Harvard University Press.
- Gross, Matthias. 2013. Old Science Fiction, New Inspiration: Communicating Unknowns in the Utilization of Geothermal Energy. *Science Communication* 35:810–819.
- Haldane, T.G.N., 1930. The heat pump – an economical method of producing low-grade heat

- from electricity. *Journal of the Institution of Electrical Engineers* 68 (402): 666-675.
- Hauser, Arturo. 1997. Catastro y caracterización de las fuentes de aguas minerales y termales de Chile (No. 50). Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Heap, R.D. 1979. *Heat pumps*. Londres: E. & F. N. Spon, Ltd. - Nueva York: Halsted Press
- Heezen, Bruce C., Marie Tharp y Maurice Ewing 1959. *The floors of the ocean, 1. The North Atlantic*. Nueva York: The Geological Society of America Special Paper 65.
- Hervé, Francisco, Francisco Muni- zaga, Estanislao Godoy y Luis Aguirre. 1974. Late Paleozoic K/ Ar ages of blueschists from Pichilemu, central Chile. *Earth and Planetary Science Letters* 23 (2): 261-264.
- Hervé, Miguel, 1976. Estudio geológico de la falla Liquiñe-Re- loncaví en el área de Liquiñe: antecedentes de un movimiento transcurrente (Provincia de Valdivia). En Actas Congreso Geológico Chileno 1: B39-B56.
- Hess, Harry Hammond. 1962. *History of ocean basins, in Petrologic studies - a volume in honor of AF Buddington*, editado por by A. E. J. Engel, Harold L. James, and B. F. Leonard, pp. 599-620. Nueva York: Geological Society of America.
- Hickson, Catherine, Fernando Ferraris, Carolina Rodríguez, Gerd Sielfeld, R. Henríquez; T. Gislason, J. Selters, D. Benoit, Phil White, J. Southon, J. Greg Ussher, Jacques Charroy, A. Smith, Brian Lovelock, Jim Lawless, P. Quinli- van, L. Smith, y Ron Yehia. 2011. The Mariposa Geothermal Sys- tem, Chile. *Geothermal Resources Council Transactions* 35: 817-825.
- Hinchliff, Thomas Woodbine. 1876. *Over the Sea and Far Away. Being a Narrative of Wanderings round the World*. Londres: Longmans, Green and Co.
- Hirsch, Eric y Michael O' Hanlon. 1995. *The Anthropology of Land- scape: Perspectives on Place and Space*. Oxford: Oxford University Press.
- Hodgson, Susan. 2013. Focus on Chile. Part I, II, and III. *Geother- mal Resources Council Bulletin* 42.
- Hughes, Llewelyn y Phillip Y. Lips- cy. 2013. The Politics of Energy. *Annual Review of Political Science* 16:1, 449-469.
- Hurtado, Nicolás. 2017. Evaluación del uso de bombas de calor geo- térmicas en invernaderos. Tesis de grado. Departamento de Inge- niería Mecánica, Universidad de Chile.
- Hurtado, Nicolás, Nicolás Pérez-Es- tay, Pablo Valdenegro, Diego Ara- vena y Diego Morata. 2021. Im- plementing a Geothermal Heat Pump in a School in Coyhaique, Chile. En Proceedings World Geothermal Congress 2020+1, abril - octubre, Reykjavik, Ice- land.
- Huttrer, Gerald W. 2020. Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report. En World Geothermal Congress 17, Reykjavik, Islandia.
- Ingold, Tim. 2000. *The Perception of the Environment*. London: Rout- ledge.

- James, David E. 1971. Plate tectonic model for the evolution of the Central Andes. *Geological Society of America Bulletin* 82: 3325–3346
- Kröger, Björn. 2013. Remarks on a scene, depicting the primeval world – A talk given by Leopold von Buch in 1831, popularizing the *Duria antiquior*. *HiN - Humboldt im Netz. Internationale Zeitschrift für Humboldt-Studien XIV*, 27, S, Potsdam – Berlín.
- Lagabrielle, Yves, Christèle Guivel, René C. Maury, Jacques Bourgois, Serge Fourcade y Hervé Martin. 2000. Magmatic–tectonic effects of high thermal regime at the site of active ridge subduction: the Chile Triple Junction model. *Tectonophysics* 326(3–4): 255–268.
- Lahsen, Alfredo. 1976. La actividad geotermal y sus relaciones con la tectónica y el volcanismo en el norte de Chile. En Primer Congreso Geológico Chileno, 2 al 7 de agosto, en Santiago.
- Lahsen, Alfredo. 1985. Origen y potencial de energía geotérmica en los Andes de Chile. *Geología y Recursos Minerales de Chile*. Chile: Editorial Universidad de Concepción: 425.
- Lahsen, Alfredo, Nelson Muñoz y Miguel A. Parada. 2010. Geothermal development in Chile. En Proceedings of the World Geothermal Congress Bali, Indonesia, 25–30 abril.
- Lahsen, Alfredo, Fabián Sepúlveda, Juan Rojas y Carlos Palacios. 2005. Present status of geothermal exploration in Chile. En Proceedings of the World Geothermal Congress Antalya, Turquía 24–29 abril.
- Lahsen, Alfredo y Patricio Trujillo. 1975. El Campo Geotérmico de El Tatio, Chile. En Proceedings: Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, 20–29 de mayo, en San Francisco, California, USA.
- Letelier, Juvenal A., John O'Sullivan, Martin Reich, Eugenio Veloso, Pablo Sánchez-Alfaro, Diego Aravena, Mauricio Muñoz y Diego Morata. 2021. Reservoir architecture model and heat transfer modes in the El Tatio-La Torta geothermal system, Central Andes of northern Chile. *Geothermics* 89: 101940.
- Levine, George. 1997. *Defining Knowledge: An Introduction*, en *Victorian Science in Context*, de Bernard Lightman. Chicago: The University of Chicago Press.
- Lund, John W. y Aniko N. Toth. 2021. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics* (febrero): 101915.
- Lyell, Charles. 1843. *Principes de géologie, ou illustrations de cette science empruntées aux changements modernes que la Terre et ses Habitants ont subis*. París: Langlois et Leclercq.
- Luzzini, Francesco. 2012. L'industria principesca. Piero Ginori Conti e l'impianto geotermico di Larderello. *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, ASr03025: 97 – 98.
- McKenzie, Dan y Robert Parker. 1967. The North Pacific: an example of tectonics on a sphere. *Nature* 216: 1276–1280.
- Manzella, Adele, Agnes Allansdottir y Anna Pellizzone (Eds.) 2019. *Geothermal energy and society*. Springer International Publishing.

- Martín, Pelegrin. 1889. *Estudios médicos sobre las aguas termales de Chillón. 4.a edición*. Valparaíso: Imprenta del Mercurio.
- Mathiez, J. P. 1962. Investigaciones Necesarias para Evaluar la Capacidad del Campo del Tatio.
- Maza, Santiago, Gilda Collo, Diego Morata, Camila Lizana, Estefanía Camus, Marco Taussi, Alberto Renzulli, Michele Mattioli, Benigno Godoy, B. Alvear, Marcela Pizarro, C. Ramírez y G. Rivera. 2018. Clay mineral associations in the clay cap from the Cerro Pabellón blind geothermal system, Andean Cordillera of Northern Chile. *Clay Minerals* 53: 117-141.
- Maza, Santiago, Gilda Collo, Diego Morata, Marco Taussi, Jeanne Vidal, Michele Mattioli y Alberto Renzulli. 2021. Active and fossil hydrothermal zones of the Apacheta volcano: insights for the Cerro Pabellón hidden geothermal system (Northern Chile). *Geothermics* 96.
- Maza, Santiago, Gilda Collo, Diego Morata, Carolina Cuña-Rodríguez, Marco Taussi y Alberto Renzulli. 2021. The hydrothermal alteration of the Cordón de Inacaliri Volcanic Complex in the framework of the hidden geothermal systems within the Pabelloncito graben (Northern Chile). *Minerals* 11: 1279.
- Mazzucato, Mariana. 2013. *The Entrepreneurial State - Debunking Public vs. Private Sector Myths*. Londres: Anthem Press.
- McNeal, Karen S., Jacob M. Spry, Ritayan Mitra y Jamie L. Tipton. 2014. Measuring student engagement, knowledge, and perceptions of climate change in an introductory environmental geology course. *Journal of Geoscience Education*: 655-667.
- Mihale-Wilson, Cristina, Patrick Felka, Oliver Hinz y Martin Spann. 2018. The Impact of Location-Based Games on Traditional Entertainment Products. *SSRN Electronic Journal*.
- Ministerio de Energía. 2016. Informe de resultados Encuesta Nacional de Energía. Feedback.
- Ministerio de Energía. 2018. Energía 2050. Política Energética Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo.
- Ministerio de Energía. 2018. Manual de Energía Distrital Diciembre. Santiago, Chile.
- Ministerio de Energía. 2018. Mesa de Geotermia: Rol de la geotermia en el desarrollo de la matriz eléctrica chilena. Santiago, Chile.
- Ministerio del Medio Ambiente. Departamento de Economía Ambiental. 2014. Análisis general del impacto económico y social del anteproyecto del Plan de Descontaminación Atmosférica de Coyhaique por MP10.
- Molina, Juan Ignacio. 1946. *Compendio de la Historia Geográfica, Natural y Civil del Reyno de Chile* (Primera Parte). Madrid: Antonio de Sancha, LXXXVIII.
- Morata, Diego. 2005. ¿Chile: un país geotérmico en un futuro inmediato? *Anales de la Universidad de Chile*, 2014.
- Morata, Diego, Luis Aguirre, Marcela Oyarzún y Mario Vergara. 2000. Crustal contribution in the genesis of the bimodal Triassic vol-

- canism from the Coastal Range, central Chile. *Revista geológica de Chile* 27(1): 83-98.
- Morata, Diego, Luis Aguirre, Gilbert Féraud, F. Fuentes, Miguel A. Parada y Mario Vergara. 2001. The Lower Cretaceous volcanism in the Coastal Range of central Chile: geochronology and isotopic geochemistry. En South American Symposium on Isotope Geology No. 3, Extended Abstracts Volume (CD), Sociedad Geológica de Chile: 321-324.
- Morata, Diego, Diego Aravena, Alfredo Lahsen, Mauricio Muñoz y Pablo Valdenegro. 2021. Chile Up-Date: The First South American Geothermal Power Plant After One Century of Exploration. En Proceedings World Geothermal Congress 2020+1 Reykjavik, Islandia.
- Morata, Diego, Nicolás Hurtado, Sofía Vargas, Tobías Hellwig, Juan Sáenz, Diego Aravena y Nicolás Pérez. 2020. Climatización geotérmica en una escuela de Coyhaique. Santiago, Chile.
- Mpodozis, Constantino y Randall Forsythe. 1983. Stratigraphy and geochemistry of accreted fragments of the ancestral Pacific floor in southern South America. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 41(1-2): 103-124.
- Muffler, P. y Raffaele Cataldi. 1978. Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics* 7: 53-89.
- Müller, Dietmar, Maria Sdrolias, Carmen Gaina y Walter R. Roest. 2008. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 9(4).
- Muñoz, Francisco, Carlos Suazo, Eduardo Pereira y Rodrigo Moreno. 2021. Electricity market design for low-carbon and flexible systems: Room for improvement in Chile. *Energy Policy* 148: 1-15.
- Muñoz, Mauricio. 2018. Bomba de calor geotérmica con intercambiadores de calor verticales cerrados en Coyhaique. Tesis de magíster. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Muñoz, Mauricio, Pablo Garat, Valentina Flores-Aqueveque, Gabriel Vargas Easton, Sofía Rebolledo, Sergio Sepúlveda, Linda Daniele, Diego Morata y Miguel A. Parada. 2015. Estimating low-enthalpy geothermal energy potential for district heating in Santiago basin-Chile (33.5° S). *Renewable Energy* 76: 186-195.
- Muñoz, Mauricio, Ernesto Meneeses y Diego Morata. 2021. Geothermal Potential to Meet Heat Demand in Magallanes, Chilean Patagonia. En Proceedings World Geothermal Congress 2020+1, abril-octubre, Reykjavik, Islandia.
- Negri, Angello, Linda Daniele, Diego Aravena, Mauricio Muñoz, Antonio Delgado y Diego Morata. 2018. Decoding fjord water contribution and geochemical processes in the Aysén thermal springs (Southern Patagonia, Chile). *Journal of Geochemical Exploration* (febrero): 1-13.
- OECD/Eurostat. 2018. Oslo Manual: Proposed Guidelines for Collecting and Interpreting Technological Innovation Data, 4th Edition. Paris/Eurostat, Luxembourg: OECD Publishing.

- Onifade, Temitope Tunbi. 2015. Peoples-Based Permanent Sovereignty over Natural Resources: Toward Functional Distributive Justice? *Human Rights Review* 16: 343–368.
- Organización de las Naciones Unidas. 1987. Informe Brundtland.
- Osses, Mauricio, Cecilia Ibarra y Bárbara Silva. 2019. El Sol al Servicio de la Humanidad. *Historia de la Energía Solar en Chile*. Santiago: RIL Editores.
- Otero, Sofía. 2014. *La Tierra de Fuego: gente y naturaleza marcadas por el calor profundo*. Santiago, Proyecto Explora Conicyt.
- Otero, Sofía. Fighting the information gap and the steam monster, the Chilean experience on geothermal outreach. 2018. En *Proceedings World Geothermal Congress*.
- Otero, Sofía y Luz Fariña. 2016. Science Communication, the Chilean way. En 14th Public Communication of Science and Technology, 26-28 de abril, Estambul, Turquía.
- Parada, Miguel A., Estanislao Godoy, Francisco Hervé y Ricardo Thiele. 1987. MIOCENE CALC-Alkalline Plutonism in the Chilean Southern Andes. *Revista Brasileira de Geociências* 17(4): 450-455.
- Parada, Miguel A., Alfredo Lahsen y Carlos Palacios. 1996. Magmatic evolution of the eastern part of the Chilean Patagonia (Aysén Region): geochronological and geochemical constraints. En Third Symposium Internacional sur la Géodynamique Andine (ISAG). Saint Malo: Editions de l'Orstom.
- Parada, Miguel A., Jennifer Nyström y Beatriz Levi. 1999. Multiple sources for the Coastal Batholith of central Chile (31–34 S): geochemical and Sr–Nd isotopic evidence and tectonic implications. *Lithos* 46(3): 505-521.
- Pardo-Casas, Federico y Peter Molnar. 1987. Relative motion of the Nazca (Farallon) and South American plates since Late Cretaceous time. *Tectonics* 6(3): 233-248.
- Pérez-Estay, Nicolás, Gonzalo Yáñez, Jorge Crempien, Tomás Roquer, José Cembrano, Pablo Valdenegro, Diego Aravena, Gloria Arancibia y Diego Morata. 2020. Seismicity in a Transpressional Volcanic Arc: The Liquiñe-Ofqui Fault System in the Puyuhuapi Area, Southern Andes, Chile (44° S). *Tectonics* 39(11): e2020TC006391.
- Perkins, Jonathan, Kevin Ward, Shanaka De Silva, George Zandt, Susan L. Beck y Noah J. Finnegan. 2016. Surface uplift in the Central Andes driven by growth of the Altiplano Puna Magma Body. *Nature Communications* 7(1), pp.1-10.
- Philippi, Rodulfo. 1862. Viaje a los baños y al nuevo volcán de Chillan. *Anales Universidad de Chile*: 279-306.
- Pissis, Pedro José Amado. 1875. *Geografía física de la República de Chile*. Santiago: Biblioteca Fundamentos de la construcción de Chile, Dibam, 2011.
- Pissis, Pedro José. 1876. *Geografía física de la República de Chile*.
- PNUD. Survey for geothermal development in Northern Chile. Report on Project Results, Conclusions and Recommendations.

- United Nations, New York, 1975. Disponible en Biblioteca del Sernameomin.
- Poepfig, Eduard. 1960. *Reise in Chile, Peru auf dem Amazonen 1827-1832*. Edición de Carlos Keller. Santiago: Zig-Zag.
- Radosevic, Slavo. 2022. Techno-Economic Transformation in Eastern Europe and the former Soviet Union – A Neo-Schumpeterian Perspective. *Research Policy* (enero).
- Ramos, Víctor, Teresa E. Jordan, Richard Allmendinger, Susan Kay, José M. Cortés y Miguel A. Palma. 1984. Chileña: un terreno alóctono en la evolución paleozoica de los Andes Centrales. En Congreso Geológico Argentino (Vol. 9).
- Reich, Martin, Nelson Román, Felipe Barra y Diego Morata. 2020. Silver-rich chalcopyrite from active Cerro Pabellón Geothermal System, Northern Chile. *Minerals* 10: 113.
- Richter, Alexander. 2018. With 2% of capacity only, geothermal represents around 6% of Enel's renewable energy generation. *Think Geoenergy* (27 de julio).
- Román, Nelson, Martin Reich, Martin, Mathieu Leisen, Diego Morata, Felipe Barra y Artur Deditius. 2019. Geochemical and micro-textural fingerprints of boiling in pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 246: 60-85.
- Romanach, Lygia M, Simone Carr-Cornish y Grace W. Muriuki. 2015. Societal acceptance of an emerging energy technology: How is geothermal energy portrayed in Australian media? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42.
- Saldivia, Miguel. 2013. Barreras a la entrada de la geotermia en Chile. Memoria para optar al grado académico de Licenciado en Ciencias Jurídicas y Sociales, Facultad de Derecho de la Universidad de Chile: 12.
- Saldivia, Miguel y Sofía Vargas. 2020. Environmental impact assessment and public participation of geothermal energy projects: The cases of Chile, Costa Rica, Colombia and Mexico. En *The Regulation and Policy of Latin American Energy Transitions*, Guimarães, Lucas Noura (ed.). Amsterdam: Elsevier.
- Sánchez, Pablo, Diego Morata, Alfredo Lahsen, Diego Aravena y Miguel A. Parada. 2011. Current status of geothermal exploration in Chile and the role of the new Andean Geothermal Center of Excellence (CEGA). *Geothermal Resources Council Transactions* 35:1215-8.
- Sánchez-Alfaro, Pablo, Gerd Sielfeld, Bart Van Campen, Patrick Dobson, Víctor Fuentes, Andy Reed, Rodrigo Palma-Behnke y Diego Morata. 2015. Geothermal barriers, policies and economics in Chile - Lessons for the Andes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51:1390-1401.
- Sánchez-Alfaro, Pablo, Martin Reich, Thomas Driesner, José Cembrano, Gloria Arancibia, Pamela Pérez-Flores, Christoph Heinrich, J. Rowland, Daniel Tardani, Dietrich Lange y Eduardo Campos. 2016. The optimal windows for seismically-enhanced gold precipi-

- piration in the epithermal environment. *Ore Geology Reviews* 79: 463-473.
- Sánchez-Alfaro, Pablo, Martin Reich, Gloria Arancibia, Pamela Pérez-Flores, José Cembrano, Thomas Driesner, Martin Lizama, Julie Rowland, Diego Morata, Christoph Heinrich, Daniele Tardani y Eduardo Campos. 2016. Physical, chemical and mineralogical evolution of the Tolhuaca geothermal system, southern Andes, Chile: Insights into the interplay between hydrothermal alteration and brittle deformation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 324: 88-104.
- Sanhueza, Carlos. 2014. *Geografía en acción. Práctica disciplinaria de Hans Steffen en Chile (1889-1913)*. Santiago: Editorial Sudamericana.
- San Román, Francisco J. 1892. *Carta Geográfica del Desierto i Cordilleras de Atacama*. Santiago de Chile: Dirección General de Obras Públicas, Sección de Jeografía y Minas.
- San Roman, Francisco J. 1896. *El desierto y cordilleras de Atacama*. Ed. 2011. Santiago de Chile: Cámara Chilena de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, Dirección de Bibliotecas, Archivos y Museos.
- Scheid John et al. 2015. *Le thermalisme: Approches historiques et archéologiques d'un phénomène culturel et médical*. Paris: CNRS Éditions.
- Sekioka, Mitsuru. 1999. Japanese Geothermal Waters through History. En *Stories from a Heated Earth: Our Geothermal Heritage*, editado por R. Cataldi, S.F. Hodgson, and J.W. Lund, 393-406. Davis, California: Geothermal Resources Council and International Geothermal Association.
- Sepúlveda, Fabián y Alfredo Lahsen. 2003. Geothermal exploration in central southern Chile (33°-41°S). En *Geothermal Resources Council Transactions Vol. 27* (12-15 de octubre).
- Siebert, Lee, Tom Simkin y Paul Kimberly. 2010. *Volcanoes of the World*. 3rd ed. University of California Press.
- Sillitoe, Richard. 1974. Tectonic segmentation of the Andes: implications for magmatism and metallogeny. *Nature* 250 (5467): 542-545.
- Simmel, Georg. 1998. *El individuo y la libertad. Ensayos de crítica de la cultura*. Barcelona: Península.
- Skewes, Juan Carlos y Debbie Guerra. 2016. Sobre árboles, volcanes y lagos: algunos giros ontológicos para comprender la geografía mapuche cordillerana del sur de Chile. *Intersecciones en Antropología* 18 (1):63-76.
- Smith, Jonathan. 1994. *Fact and feeling: Baconian science and the nineteenth-century literary imagination*. Londres: University of Wisconsin Press.
- Spelling, Alex. 2013. Recrimination and reconciliation: AngloAmerican relations and the Yom Kippur War. *Cold War History* 13:4: 485-506.
- Stauffacher, Michael, Nora Muggli, Anna Scolobig y Corinne Moser. 2015. Framing deep geothermal energy in mass media: the case of Switzerland. *Technological Forecasting and Social Change* 98: 60-70.

- Stoichita, Victor I. 1993. *La invención del cuadro: arte, artífices y artificios en los orígenes de la pintura europea*. Madrid: Serbal.
- Sundt, Lorenzo. 1909. *Estudios Jeológicos i Topográficos del Desierto i Puna de Atacama*.
- Tardani, Daniel, Martin Reich, Emilie Roulleau, Naoto Takahata, Yuji Sano, Pamela Pérez-Flores, Pablo Sánchez-Alfaro, José Cembrano y Gloria Arancibia. 2016. Exploring the structural controls on helium, nitrogen and carbon isotope signatures in hydrothermal fluids along an intra-arc fault system. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 184, pp.193-211.
- Taussi, Marco, Bárbara Nisi, Orlando Vaseli, Santiago Maza, Diego Morata y Alberto Renzulli. 2021. Soil CO₂ flux and temperature from a new geothermal area in the Cordón de Inacaliri volcanic complex (Northern Chile). *Geothermics* 89.
- Taussi, Marco, Bárbara Nisi, Marcela Pizarro, Diego Morata, Eugenio A. Veloso, Gianni Volpi, Orlando Vaselli y Alberto Renzulli. 2019. Sealing capacity of clay-cap units above the Cerro Pabellón hidden geothermal system (northern Chile) derived by soil CO₂ flux and temperature measurements. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 384: 1-14.
- Tesser, Claudio. 2000. Algunas reflexiones sobre el significado del paisaje para la geografía. *Revista de Geografía Norte Grande* 27:19-26.
- Tester, Jefferson W, Brian J. Anderson, Anthony Batchelor, David Blackwell, Ronald DiPippo, Elisabeth Drake, John Garnish, Bill Livesay, Michal Moore y Kenneth Nichols. 2006. The Future of Geothermal Energy. *Massachusetts Institute of Technology* 358.
- Thomson, William. 1852. LXVII. On the dynamical theory of heat. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 4 (diciembre): 424-434.
- Tsing, Anna Lowenhaupt. 2019. *Viver nas ruínas: paisagens multiespécies no Antropoceno*. Brasília: IEB-Mil folhas.
- Tilley, Christopher Y. 1994. *A Phenomenology of Landscape: Places, Paths, and Monuments*. Oxford: Berg.
- Tocchi, Ettore. 1923. Studio geologico e geotermico del Tatio cileno. Italy: Reserved report to Larderello SA.
- Tocchi, Ettore. 1923. Il Tatio, Ufficio Geológico Larderello SpA. Unpublished Report.
- Urzúa, Luis, Tom Powell, William Cumming y Patrick Dobson. 2002. Apacheta: a new geothermal prospect in northern Chile. En Geothermal Resources Council Annual Meeting, Reno NV, Actas 26: 65-69.
- Uyarra, Elvira, Jon Mikel Zabala Iturriagoitia, Kieron Flanagan y Edurne Magrod. 2020. Public procurement, innovation and industrial policy: Rationales, roles, capabilities and implementation. *Research Policy* (febrero).
- Vargas, Sofía. 2017. Energía geotérmica en los medios chilenos: la oveja negra de las renovables. En IAMCR, 16-20 de julio, Cartagena, Colombia.
- Vargas-Payera, Sofía. 2018. Understanding social acceptance of geo-

- thermal energy: Case study for Araucanía region, Chile. *Geothermics* 72:138-144.
- Vargas-Payera, Sofía y Nicolás Hurtado. 2020. From Pure Science to Applied Projects: Direct Use of Geothermal Energy in Patagonia. En World Geothermal Congress 5, Reykjavik, Islandia.
- Vargas-Payera, Sofía, Amanda Martínez-Reyes y Olivier Ejderyan. 2020. Factors and dynamics of the social perception of geothermal energy: Case study of the Tolhuaca exploration project in Chile. *Geothermics* 88.
- Vázquez, Mercedes, Fernando Nieto, Diego Morata, Bárbara Droguett, Javier Carrillo-Rosúa y Salvador Morales. 2014. Evolution of clay mineral assemblages in the Tinguiririca geothermal field, Andean Cordillera of central Chile: an XRD and HRTEM-AEM study. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 282: 43-59.
- Vergara, Mario, Beatriz Levi, Jan Olov Nystrom y Alejandro Cancino. 1995. Jurassic and Early Cretaceous island arc volcanism, extension, and subsidence in the Coast Range of central Chile. *Geological Society of America Bulletin* 107: 1427-1440.
- Vernal, Teresa, Lorena Valderrama, Joaquín Contreras y Tamara Arriola. 2019. Percepción de la formación y la especialización del periodismo científico en Chile. *Cuadernos. info*, (45): 213-226.
- Vila, Jean-Marie. 2000. *Dictionnaire de la tectonique des plaques et de la géodynamique*. París: Gordon and Breach Sciences Publishers.
- Villalobos, Andgelo, Gabriel Easton, Andrei Maksymowicz, Sergio Ruiz, Galderi Lastras, Gregory De Pascale y Hans Agurto-Detzel. 2020. Active Faulting, Submarine Surface Rupture, and Seismic Migration Along the Liquiñe-Ofqui Fault System, Patagonian Andes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 125(9): e2020JB019946.
- Vine, Frederick y Drummond Matthews. 1963. Magnetic anomalies over oceanic ridges. *Nature* 199(4897): 947-949.
- Von Humboldt, Alexander. 2011. *Cosmos. Ensayo de una descripción física del mundo*. Edición e introducción de Sandra Rebok; prólogo de Miguel Ángel Puig-Samper; epílogo de Ottmar Ette. Madrid-Santiago: Libros de la Catarata, Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Dibam.
- Von Tunzelmann, Nick. 2010. Alignment, Misalignment and Dynamic Network-Based Capabilities. En *Network Dynamics in Emerging Regions of Europe*, ed. D.A. Dyker, 3-22. Londres: Imperial College Press.
- Wegener, Alfred. 1929. Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. *Nature* (octubre).
- Wood, Karl E. 2012. *Health and Hazard. Spa Culture and the Social History of Medicine in the Nineteenth Century*. Cambridge: Cambridge Scholars Publishing.
- White, Donald Edward y David Williams. 1975. Assessment of geothermal resources of the United States, 1975 (No. 726-730), US Department of the Interior, Geological Survey.

- Wüstenhagen, Rolf, Maarten Wol-sink y Mary Jean Burer. 2007. Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. *Energy Policy*:2683–2691.
- Zandt, George, Mark Leidig, Josef Chmielowski, David Baumont y Xiaohui Yuan. 2003. Seismic detection and characterization of the Altiplano-Puna magma body, central Andes. *Pure and Applied Geophysics* 160: 789–807.
- Zarrouk, Sadiq J, y Hyungsul Moon. 2014. Efficiency of Geothermal Power Plants: A Worldwide Review. *Geothermics* 51: 142–53.
- Zeil, Werner. 1959. Geysire und Fumarolen in den Anden Nordost-Chiles. - Photographie u. Wissenschaft, 6, 3/4, S. 9-11, Leverkusen 1957. Junger Vulkanismus in der Hochkordillere der Provinz Antofagasta (Chile). *Geologische Rundschau* 48, 1.
- Zogg, M. 2008. History of heat pumps-Swiss contributions and international milestones. Swiss Federal Office of Energy SFOE.

Geotermia en Chile: un siglo de historia para un desarrollo sustentable

Momentos de crisis ambiental, social y climática, como la que vivimos hoy, ponen en evidencia lo valioso y lo superfluo. En ese contexto y en el nuevo orden que tomen las cosas, este libro es un esfuerzo por posicionar y visibilizar la geotermia, el calor de la Tierra, como una energía limpia y soberana en el territorio, una aliada natural para satisfacer las necesidades energéticas y promover comunidades resilientes ante los impactos del cambio climático.

Este libro es una muestra de aspectos de la historia de la geotermia en Chile con perspectiva de futuro, de lo que tenemos como país y que debería ser valorado. Sus capítulos se construyen desde una mirada interdisciplinaria y recorren episodios como las primeras aproximaciones de los naturalistas del siglo XIX a la ciencia de geólogas y geólogos del siglo XXI; desde sus aplicaciones para generar electricidad hasta sus usos directos, desde sus aspectos legales hasta su impacto social.



FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE



FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE

Este ejemplar es un legado del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes, CEGA, a la comunidad geotérmica, pero por sobre todo para quienes se quieren acercar a esta energía y sumarse a la cruzada por transformar a Chile en un país que usa el calor de la Tierra para mejorar la calidad de vida de sus habitantes.

