

¿CHILE: UN PAÍS GEOTÉRMICO
EN UN FUTURO INMEDIATO?

Diego Morata

DIEGO MORATA

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), Proyecto FONDAP CONICYT 15090013.

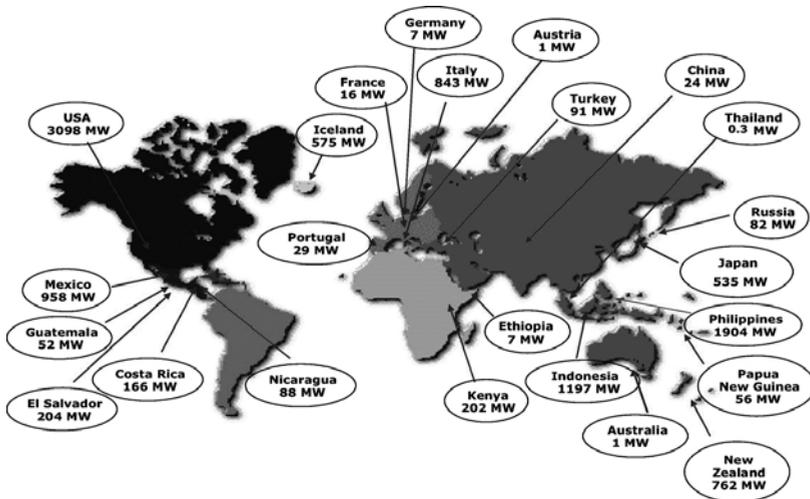
¿CHILE: UN PAÍS GEOTÉRMICO EN UN FUTURO INMEDIATO?

Departamento de Geología y Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Plaza Ercilla 803, Santiago.

INTRODUCCIÓN

La geotermia es el calor almacenado en el interior de la Tierra desde que esta se formó hace unos 4.560 millones de años. Esta fuente de calor puede ser aprovechada para generar electricidad, temperar recintos u otras múltiples aplicaciones en lo que se conoce como energía geotérmica. Sin embargo, no hay que olvidar que el aprovechamiento de las manifestaciones termales naturales tiene sus orígenes en los comienzos de la humanidad, tanto para usos domésticos como balneológicos y terapéuticos (construcciones de termas durante el Imperio romano, uso de aguas termales para cocción de alimentos, etc.), por lo que la relación entre el hombre y la geotermia se comenzó a desarrollar casi desde el comienzo de la humanidad (Cataldi et al., 1999).

Figura 1
DISTRIBUCIÓN DE LA CAPACIDAD DE GENERACIÓN ELÉCTRICA
EN EL MUNDO (10.9 GW) AL AÑO 2010
(tomado de Bertani, 2010).



Conforme a la última recopilación realizada en el año 2012 por Bertani, hoy en día se está produciendo electricidad a partir de la geotermia en veinticuatro países (Figura 1), sobre todo en aquellos ubicados en zonas de alto gradiente geotérmico, es decir, zonas

en donde hay un gran aumento de la temperatura con la profundidad. Se estima como gradiente geotérmico normal valores del orden de los 25 a 30°C/km, mientras que valores del orden de los 40 a 50°C/km podrían ya considerarse como zonas con un gradiente geotérmico anómalamente alto. El potencial eléctrico instalado en el mundo es de unos 11.000 MW, siendo los EEUU, Filipinas, Indonesia, México e Italia los principales países generadores de electricidad mediante geotermia (Bertani, 2012), destacando países como Islandia o Nueva Zelanda en los que la generación de electricidad a través de la geotermia supone hasta un alto porcentaje de su matriz energética. Estas zonas de alto gradiente geotérmico coinciden, además, con áreas geológicamente activas, por lo general en relación con límites de placas tectónicas, tanto en márgenes divergentes como en márgenes convergentes. Otra de las consecuencias asociadas a estas zonas de alto gradiente geotérmico es el desarrollo de volcanismo activo y, por tal motivo, existe una fuerte relación entre geotermia y volcanismo. Pero hay que destacar que también se produce electricidad a partir de la geotermia en países en los que no hay actividad volcánica reciente, como es el caso de Alemania, con una capacidad instalada de 7.1 MW y una proyección al año 2015 de 15 MW instalados (Bertani, 2012). Además, la geotermia se utiliza no solo para producir electricidad, sino que también para lo que se conoce como uso directo. De hecho, conforme a las últimas estimaciones (Lund et al., 2011), en el mundo ya hay un total de setenta y ocho países en los que la geotermia se utiliza de forma directa, principalmente mediante bombas de calor o para actividades tales como balneología, calefacción distrital o invernaderos, entre otras, suponiendo un total de 48.5 GW instalados. Es de destacar que en esta otra aplicación de la geotermia, para usos directos, se desarrolla en países con volcanismo activo pero también en otros países caracterizados por un bajo gradiente geotermal y con ausencia de volcanismo activo reciente, como es el caso de Alemania, con una capacidad instalada de geotermia al 2010 para uso directo del orden de los 2.5 GW (frente a los 9.1 MW en Chile, principalmente en termas; Lund et al., 2011).

A lo largo de la cordillera de los Andes de Chile se distribuyen cerca de 3.000 volcanes, de diferentes tamaños, morfologías y características. De estos, se estima que unos quinientos están activos (es decir, han tenido alguna actividad durante los últimos 10.000 años, conforme a la definición de volcanismo potencialmente activo propuesta por Francis, 1995), siendo sesenta los que tienen registro eruptivo histórico en los últimos 450 años (Stern et al., 2007). Esta gran proliferación de volcanes en nuestro territorio es consecuencia del ambiente geológico en el cual se encuentra Chile, en un margen convergente gobernado por la subducción de una placa oceánica bajo un margen continental. Entonces, una pregunta obvia que se está haciendo la sociedad chilena, en estos últimos años en los que se habla de posible crisis energética y necesidad de diversificar la matriz energética, es: ¿Por qué si Chile tiene entonces tal cantidad de volcanes no se utiliza esta energía para producir electricidad? Si bien es esta una pregunta con cierta lógica, hay una serie de barreras que existen hoy día en el país y que están haciendo que el desarrollo de la geotermia vaya a una velocidad mucho más lenta de lo deseable, a pesar de contar Chile con uno de los mayores potenciales geotérmicos del mundo aún sin explotar.

En el presente trabajo se abordarán algunos conceptos fundamentales sobre el desarrollo de la energía geotérmica, el desarrollo de la investigación en geotermia en el país y el estado actual de la exploración geotérmica.

CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE UN SISTEMA GEOTÉRMICO

Existen diferentes tipos de sistemas geotermiales, cuyas singularidades están dadas por varias combinaciones de variables geológicas. Son estas múltiples combinaciones las que hacen que no haya dos sistemas geotermiales exactamente iguales, aunque, en términos generales, cuatro son los principales factores que controlan la existencia de sistemas geotérmicos:

- Fuente de calor (generalmente asociada a cuerpos magmáticos intrusivos o cámaras magmáticas activas);
- Desarrollo de estructuras (principalmente fallas) que delimiten el recurso y favorezcan la percolación de fluidos;
- Recarga de agua desde la superficie hasta las profundidades, donde es calentada por la fuente de calor;
- Roca huésped del recurso geotérmico (reservorio) con capacidad para almacenar los fluidos termales, y con las óptimas características de permeabilidad y porosidad que permitan el manado del flujo termal para poder ser extraído a superficie.

Por otro lado, en función de la naturaleza y temperatura del reservorio, se establecen varias clasificaciones y, en este sentido, se habla de sistemas de baja temperatura para aquellos reservorios que contienen agua a temperaturas entre los 20 y 100°C; sistemas de agua dominante para aquellos reservorios dominados por agua y con temperaturas hasta los 350°C; sistemas de vapor dominante (o vapor seco), con reservorios dominados por vapor; y sistemas de rocas secas calientes, compuesto por rocas impermeables y con altas temperaturas, pero con ausencia de fase fluida para transmitir el calor. Otra clasificación normalmente utilizada es la que se basa en la entalpía (o temperatura) del sistema, definiéndose en este caso sistemas de baja entalpía (con temperaturas menores a los 90°C), sistemas de mediana entalpía (con temperaturas entre los 90 y 190°C), y sistemas de alta entalpía (con temperaturas superiores a los 190°C). Serán estos últimos sistemas los más interesantes para la producción de electricidad aunque, mediante plantas de ciclo binario, es también posible producir electricidad a partir de sistemas de mediana entalpía. Por lo general, los sistemas de baja entalpía son restringidos en su uso a lo que se define como usos directos (calefacción distrital, invernaderos, piscifactoría, balneología, etc.).

El primer país en el mundo en aplicar la geotermia para la generación de electricidad fue Italia, en la región de Larderello, comenzando la producción en los albores del siglo XX (año 1905) mediante máquinas de vapor, e instalando las primeras grandes centrales en el año 1912. Estas primeras experiencias en el desarrollo de la geotermia fueron

rápida­mente replicadas en otros países, en los que se comienzan a desarrollar temprana­mente estudios de exploración geológica y perforaciones profundas encaminadas a reconocer e identificar reservorios geotérmicos. Es así como se comienzan a desarrollar campañas de exploración en Japón (Beppu, 1919), Chile (El Tatio, 1921), EEUU (los géiseres, 1921) e Islandia (Reikiavik, 1925). Es por lo tanto interesante analizar el caso del desarrollo de la geotermia en Chile, ya que fue este uno de los países pioneros en lo concerniente a la exploración geotérmica, aunque después de casi un siglo de ese evento, hasta el día de hoy, no se ha producido aún ni un solo MW de electricidad mediante geotermia.

CONTEXTO GEOLÓGICO DE CHILE

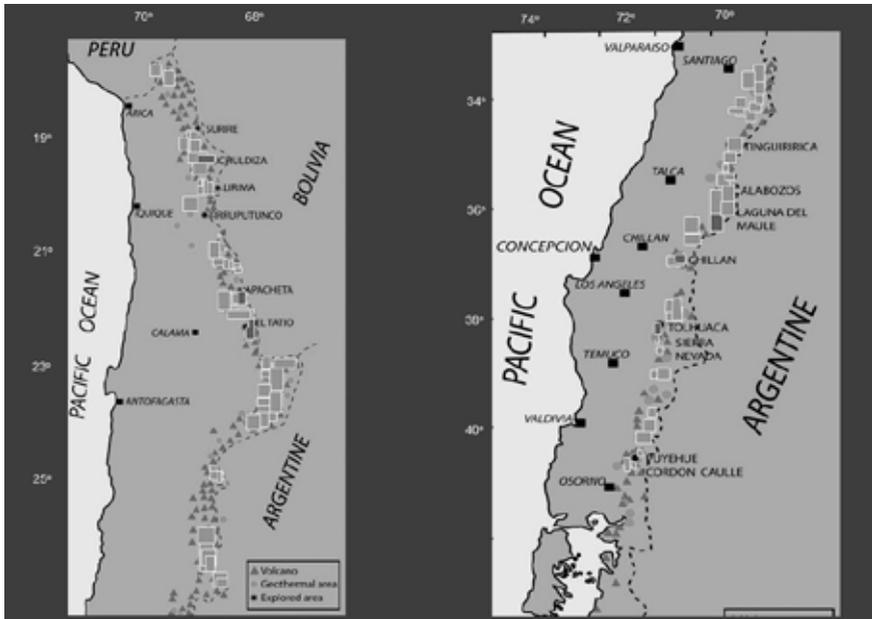
Chile continental se ubica en lo que geológicamente se conoce como un margen convergente, es decir, un límite de placas en donde una placa tectónica subduce bajo otra. En el caso del margen chileno, se tiene la subducción de las placas de Nazca y Antártica bajo la placa Sudamericana y, como consecuencia de este proceso de subducción, que se ha mantenido de manera similar durante al menos los últimos 180 millones de años, hay presencia de sismicidad, volcanismo, depósitos de Cu-Au y existencia de reservorios geotermiales, entre otras. El volcanismo activo se localiza hoy día en la cordillera de los Andes (Figura 2), y su distribución y características petrológicas y geoquímicas están controladas por el ángulo de la placa subductada. De este modo, dado el bajo ángulo de subducción que presenta la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana entre los 28°-33° (ángulos de unos 5-10°), hoy día esta zona se conoce como *flat slab* y, entre otras consecuencias, el volcanismo Cuaternario está ausente. Sin embargo, este volcanismo activo está presente al norte de la zona de *flat slab* y al sur de la misma, es decir, al norte de los 28°S y al sur de los 33°S.

Además, en el sur de Chile, entre los 46° y 48°S se produce una singularidad geológica, consistente en la subducción de una dorsal activa (la dorsal de Chile, límite entre las placas de Nazca y Antártica) bajo el continente, generándose lo que se conoce como un punto triple (conjunción de tres placas tectónicas, en este caso las de Nazca, Antártica y Sudamericana). Este segmento de la cordillera andina también presenta ausencia de volcanismo activo, volviendo este a aparecer al sur de los 48°S, en donde se produce la subducción de la placa Antártica bajo la placa Sudamericana, desarrollándose al menos unos seis volcanes activos.

Sin embargo, esta geometría de la zona de subducción ha ido cambiando en los últimos millones de años, por lo que la fotografía instantánea que hoy día podemos ver en lo que se conoce como cordillera de los Andes no siempre fue así, zonas que hoy no presentan volcanismo activo, sí lo tuvieron en un pasado geológico, y otras que hoy día presentan volcanismo activo, pero que no fue así en el pasado. Por lo tanto, el poder conocer de manera precisa la historia geológica de la cordillera de los Andes permitirá entender qué zonas son las más favorables para presentar anomalías termales y su posible aplicación para producir electricidad mediante geotermia.

Figura 2

DISTRIBUCIÓN DE ÁREAS GEOTERMALES EN CHILE, VOLCANISMO Y ÁREAS CONCESIONADAS (cuadrados rojos). En verde se destacan las áreas geotermales con mayor desarrollo en la exploración, destacando el campo geotermal de Apacheta en el norte y el de Tolhuaca en el sur (tomado de Sánchez et al., 2011)



En este sentido, más de trescientas manifestaciones termales superficiales (fumarolas, piscinas calientes, piscinas de barro, etc.) se distribuyen actualmente a lo largo de los Andes de Chile, principalmente en relación con el volcanismo Cuaternario (Hauser, 1997; Lahsen et al., 2010; Sánchez et al., 2011). Estas zonas termales están distribuidas en la alta cordillera de los Andes, tanto en el norte (17-27°S) como en el centro-sur de Chile (33-46°S), mientras que en las zonas en donde hoy en día el volcanismo activo está ausente (entre los 28-33° y 46-48°S), así como en la cordillera de la costa, las manifestaciones termales son poco frecuentes y, por lo general, con temperaturas inferiores a los 30°C (Hauser, 1997; Lahsen et al., 2005). Sin embargo, existen singularidades geológicas ligeramente diferentes entre las manifestaciones termales del norte y centro-sur del país. En este sentido, las manifestaciones termales del norte de Chile suelen estar asociadas a cuencas tectónicas (*grabens*) orientadas según direcciones NS a NO en proximidades a centros volcánicos, mientras que en la zona centro-sur de Chile, la gran mayoría de las manifestaciones termales están ubicadas en áreas con un fuerte control estructural y presencia de volcanismo activo, destacando el sector entre los 39 y 46°S, en donde la gran mayoría de las manifestaciones termales están relacionadas con el sistema de fallas Liquiñe-Ofqui (Alam et al., 2010; Sánchez et al., 2013).

Con este contexto geológico tan favorable, es fácil entender el alto interés que está suscitando Chile para el desarrollo de la geotermia. De hecho, en el estudio preliminar

realizado por Lahsen en el año 1986, se indicó que el potencial geotérmico del país sería del orden de 16.000 MW por, al menos, cincuenta años, con fluidos con temperaturas sobre los 150°C y estando ubicados los reservorios a profundidades inferiores a los 3.000 m (Lahsen, 1986). Cifras mucho más conservadoras respecto al potencial geotérmico de Chile han sido dadas desde el sector privado, proponiendo un potencial del orden de los 3.500 MW que podrían implementarse en un período de veinte años, considerando la tecnología actualmente vigente (Soffia y Clavero, 2010). Sin embargo, lo que resulta paradójico es que, a pesar de tener un gran potencial geotérmico, este aún no se haya desarrollado y, al día de hoy, no se haya conseguido producir aún ningún MW de electricidad mediante geotermia.

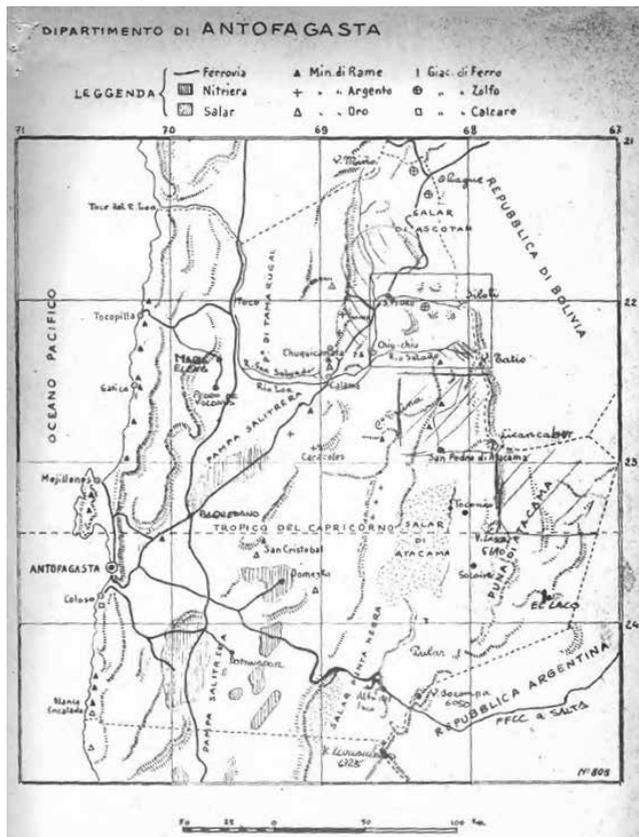
EVOLUCIÓN DE LA EXPLORACIÓN E INVESTIGACIÓN GEOTÉRMICA EN CHILE

Como se señaló anteriormente, Chile fue uno de los países pioneros en el desarrollo de la exploración geotérmica. A comienzos del siglo XX, miembros de la colonia italiana de Antofagasta crearon la sociedad privada Comunidad de El Tatio, con el fin de analizar las posibilidades de producir electricidad mediante geotermia en este sector del norte del país. Esta sociedad hizo traer a un grupo de ingenieros italianos de Larderello, los que estuvieron trabajando durante los años 1921 y 1922, y llegaron incluso a perforar dos pozos de unos 70 a 80 m de profundidad, estableciendo una primera aproximación al potencial geotérmico de la zona (Tocchi, 1923, Figura 3). Brügger (1940) realizó un informe geológico sobre los géiseres Volcanes del Tatio, realizando una descripción de los mismos así como de las manifestaciones termales observables en superficie. En este estudio, J. Brügger señala que el Ing. E. Tocchi, en su informe de 1923, informó que *“la región activa del Tatio es, a lo menos, 5 veces superior a la de Larderello”*. Sin embargo, no fue sino hasta finales de los años 60 que se vuelven a retomar los estudios sobre determinadas zonas geotermiales de Chile. Un estudio detallado de la historia de la exploración geotérmica en Chile durante esa época y los años posteriores fue desarrollado por Lahsen et al. (2005). Conforme a este estudio, con posterioridad al primer informe por parte de los ingenieros italianos de comienzos del siglo XX y el informe de J. Brügger de 1940, se desarrolló desde finales del año 1968 un programa de exploración geotérmica de manera sistemática en el norte del país, en concreto entre los 17 y 24°S. Este programa de exploración fue el resultado de un proyecto suscrito por la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Como resultado de este programa, se realizaron durante los años 1968 a 1976 estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos en áreas geotermiales del norte de Chile, destacando entre otras las de Surire, Puchuldiza y El Tatio (ver Figura 2). Se llegó incluso a perforar una serie de pozos exploratorios para analizar el potencial geotérmico en los campos geotermiales de Puchuldiza y El Tatio (Lahsen, 1976). Durante la década del 80, el desarrollo de la investigación en geotermia en Chile no fue especialmente relevante, paralizándose incluso los programas de exploración geotérmica a partir de 1979, y destacando únicamente los trabajos de Lahsen (1986, 1988) y Grunder et al. (1987), estando enfocado este último en el campo geotermal Calabozos, en el centro de Chile. Es de destacar

de esta época el trabajo de Lahsen (1988) en la revista internacional *Geothermics*, en donde se da a conocer a la comunidad internacional el potencial geotérmico de Chile (del orden de los 16.000 MW), así como su posible utilización para la generación de electricidad. 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 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 del país, mientras que en el sur la cooperación se hizo con la Compañía Francesa de Geotermia (CFG), finalizando en el año 1995 con un pozo exploratorio de 274 m de profundidad en el campo geotermal de Nevados de Chillán, obteniéndose temperaturas próximas a los 200°C. En el ámbito de la investigación, destacan los trabajos de Hauser (1997) por parte del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), 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.

Figura 3

MAPA DE LA REGIÓN DE ANTOFAGASTA, REALIZADO POR EL ING. E. TOCCHI, SOBRE EL PRIMER ESTUDIO GEOLÓGICO-GEOTÉRMICO DE EL TATIO EN EL AÑO 1923



El siglo XXI supuso un cambio importante en la investigación y desarrollo de la geotermia en Chile. En el año 2000, el SERNAGEOMIN publicó un listado de áreas termales de Chile, contabilizándose un total de ciento veinte manifestaciones termales clasificadas como “fuentes probables”. En el mismo año, se proclama la Ley N° 19.657 (año 2000), también conocida como la Ley Geotérmica, que determina el marco regulatorio de la exploración y desarrollo geotérmico en Chile. Esta ley establece el concepto de concesiones de exploración y de explotación y se licitan áreas a lo largo del país para exploración geotérmica. Las concesiones de exploración tienen vigencia de dos años, pudiendo extenderse por dos años más, si es que se acredita un mínimo de avance en el programa de trabajo establecido y un presupuesto comprometido del 25%. Pasado ese tiempo, las empresas dueñas de las concesiones tendrían un período exclusivo de dos años para obtener la concesión de explotación y, una vez obtenido (incluyendo el estudio de impacto ambiental, entre otros requerimientos), se obtendría la concesión de explotación por un período de, al menos, veinte años. Esta nueva ley de concesiones geotérmicas animó a empresas privadas a realizar 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 importante de áreas donde estas empresas desarrollaron (y siguen desarrollando) campañas de exploración superficial e, incluso, en algunas de ellas, nuevos pozos exploratorios o, incluso, de producción (Tinguiririca, Cerro Pabellón, Tolhuaca). No obstante, tras trece años de existencia de esta ley de concesiones geotérmicas, aún ni siquiera tenemos en el país plantas geotérmicas en construcción y aún estamos lejos de tener producción de electricidad mediante geotermia.

Adicionalmente, la coyuntura de la matriz energética de Chile en los últimos años sufrió un par de eventos importantes. En los años 1998 y 1999 se produjo una gran crisis energética, que supuso un fuerte racionamiento eléctrico, incluso con cortes de luz programados. Y, durante 2007 y 2008 se suspendió el aporte de gas natural procedente de Argentina, lo que encareció enormemente la generación de electricidad en el país y mostró la fragilidad de la matriz energética. La primera década del siglo XXI supone una serie de cambios en el panorama energético del país. En el año 2010, se crea el Ministerio de Energía (Ley N° 20.402), independizándose esta cartera del Ministerio de Minería y Energía. Será misión de aquel ministerio la elaboración y coordinación de los planes, políticas y normas que permitan asegurar el suministro eléctrico para el buen desarrollo del país. Además, las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) comienzan a irrumpir en el discurso político y en la sociedad y, en este sentido, dentro del Ministerio de Energía se crea la División de Energías Renovables No Convencionales, teniendo entre otras responsabilidades la elaboración de normativas y la tuición de los procesos de licitación y concesiones geotérmicas. Sin embargo, a pesar de todos estos esfuerzos, a finales del año 2012, la matriz energética de Chile, con una capacidad total instalada del orden de los 17.5 GW, sigue siendo fuertemente dependiente de combustibles fósiles (de los que Chile carece como recurso) o de condiciones climáticas que permitan la generación eléctrica mediante centrales hidroeléctricas. De hecho, conforme a los

datos del Ministerio de Energía, la matriz eléctrica en el 2012 estaba conformada por hidroelectricidad (35%), gas natural (29%), carbón (20%), petróleo (13%) y ERNC (3%, eólica, solar y biomasa). Durante la campaña presidencial del actual Presidente de la República, don Sebastián Piñera, se planteó el concepto del 20/20, proponiendo que para el 2020, el 20% de la matriz energética del país estuviese suministrada por las ERNC. Recientemente, se ha aprobado la ley 20/25, mediante la cual el país se compromete a que en el 2025, el 20% de la matriz energética provenga de las ERNC. Más aún, el informe *Escenarios Energéticos Chile 2030* apunta a un considerable aumento de la energía geotérmica dentro de la matriz energética de Chile, tanto en el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) como en el Sistema Interconectado Central (SIC). Este nuevo panorama socio-político-económico-energético ha favorecido la incursión de numerosas empresas explorando campos geotermiales a lo largo del país. De hecho, a la fecha, hay unas setenta concesiones de exploración desarrolladas por unas quince compañías nacionales e internacionales, algunas de ellas procedentes del ámbito de la minería, seis concesiones de explotación y dos proyectos con el estudio de impacto ambiental aprobado. Sin embargo, la realidad, a pesar de todo este panorama tan prometedor y esperanzador, es que en la actualidad, “*Chile es una de las mayores reservas geotérmicas del mundo aún sin desarrollar*” (Lahsen et al., 2005).

También, este siglo XXI supuso un cambio importante en la investigación en geotermia en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Así, durante los años 2000 a 2003, se desarrolló un proyecto de investigación en conjunto con ENAP en el centro-sur del país. El objetivo de este proyecto fue la caracterización de los recursos geotermiales de este sector del país. Resultados de este proyecto fueron la definición de determinadas zonas con alto potencial geotérmico, destacando las de Nevados de Chillán y las de Puyehue-Cordón Caulle (ver Fig. 1). Precisamente en esta última zona se desarrolla la tesis doctoral de F. Sepúlveda (2006), siendo esta la primera tesis doctoral desarrollada en geotermia en la Universidad de Chile y en el país. Varios trabajos fueron publicados a raíz de esta tesis doctoral (Sepúlveda et al., 2004, 2005 a y b, 2007). Finalmente, en el marco del 3° Concurso FONDAP de CONICYT, en el año 2010, el Departamento de Geología de la Universidad de Chile se adjudica, como institución principal, el proyecto Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), financiado por cinco años y renovable por otros cinco más, con el fin de generar conocimiento científico sobre los sistemas geotermiales de Chile, a fin de poder ayudar, desde la ciencia, al desarrollo de la geotermia en el país.

SITUACIÓN ACTUAL DE LA GEOTERMIA EN CHILE

Tal y como se ha mostrado en este trabajo, Chile presenta una clara paradoja en cuanto al desarrollo de la geotermia. Cuando estamos próximos a cumplir un siglo desde que aquellos ingenieros italianos realizasen los primeros estudios en el campo geotermal de El Tatio hasta el día de hoy, varios han sido los intentos por desarrollar un programa de generación de electricidad mediante geotermia, pero ninguno ha prosperado. Sin

embargo, en estos últimos años, y dado los cambios en el precio de la electricidad y una mayor conciencia en generar electricidad mediante lo que se conoce como ERNC, se ha visto un importante incremento en la exploración geotérmica en el país. De hecho, en la actualidad, hay unas setenta concesiones de exploración, ocho de explotación (las dos últimas aceptadas en el mes de agosto 2013) y dos de ellas ya con el estudio de impacto ambiental aprobado. Fue así como el 6 de abril del año 2012 el Servicio de Evaluación Ambiental del Gobierno Regional de Antofagasta otorgó a la empresa Enel Green Power (EGP), a través Geotérmica del Norte (GDN), en *joint-venture* con ENAP, el permiso ambiental para el área geotermal 50 MW, llamado Cerro Pabellón, localizado en el llano de Pampa Apacheta, en la comuna de Ollagüe, Región de Antofagasta, a 120 km de la ciudad de Calama (4.300 msnm). Esta planta tendría una producción aproximada de 375 GWh de energía limpia, evitando así la emisión de cerca de 250.000 toneladas de CO₂ al año, así como la importación de 100.000 toneladas de diesel y de 135 toneladas de carbón (información suministrada mediante nota de prensa de la empresa EGP). En el sur de Chile, la empresa Mighty River Power (MRP) adquirió recientemente los derechos del campo geotérmico Tolhuaca, explorado previamente por la empresa Geo Global Energy (GGE). En este campo geotérmico se realizó el pozo Tol-4 (2.300 m de profundidad) que, con un potencial de 12 MW, lo convierte en el pozo más productivo de Sudamérica (nota de prensa de GGE del 27 de agosto de 2012). El campo geotérmico Tolhuaca se encuentra ubicado en el volcán homónimo y los estudios preliminares realizados por los geólogos de GGE apuntan a que este campo podría tener un potencial de hasta 50 MW.

Las otras áreas geotermales de Chile están aún en la etapa de exploración superficial, algunas con pozos exploratorios ya realizados y en etapa de valorizar el potencial del recurso. Una recopilación actualizada de estas zonas puede encontrarse en los trabajos de Lahsen et al. (2010) y Sánchez et al. (2011).

Sin embargo, a pesar de este panorama relativamente auspicioso y prometedor, existen aún hoy día barreras importantes que impiden un desarrollo fluido de la geotermia en Chile. Cuatro son los requisitos necesarios para el desarrollo de la geotermia. En primer lugar, es necesaria la presencia del recurso geotérmico. Claramente, parece evidente que este no sería inconveniente en el desarrollo de la geotermia, ya que si bien el valor de 16.000 MW propuesto por Lahsen (1986) aún no ha podido ser comprobado, y a pesar de que estimaciones más conservadoras establecen entre 3.000 y 3.500 MW el potencial geotérmico en Chile, nadie niega que Chile posee importantes recursos geotérmicos que aún no han sido explotados. El segundo requisito es la existencia del recurso humano. Es necesario en el país el desarrollo de programas de investigación y desarrollo en geotermia. Precisamente, en el CEGA estamos desarrollando investigación en el ámbito de la geotermia, formando estudiantes de pre y postgrado que serán los profesionales que en el futuro trabajarán en las plantas geotérmicas. Además, en el CEGA estamos instalando facilidades analíticas que contribuirán a mejorar el desarrollo de la exploración geotérmica y, de este modo, aumentar el conocimiento de los sistemas geotermales andinos. El tercer requisito para el desarrollo de la geotermia tiene que ver con el aspecto económico. Es cierto que la geotermia, a diferencia de otras

ERNC, precisa de una fuerte inversión inicial en exploración geológica y geofísica. Pero esta etapa inicial es necesario desarrollarla de manera óptima, ya que es la única forma de mitigar la incertidumbre asociada a la localización del reservorio geotérmico. Este es uno de los aspectos que las empresas que están hoy día explorando en geotermia ven con más preocupación, ya que no existe subsidio por parte del Estado para poder compensar la inversión en exploración si es que esta no resulta positiva. Hay experiencias en otros países, donde se ha desarrollado la geotermia, donde el papel del Estado es clave, ya que fue el Estado quien inició la exploración geotérmica y quien adoptó a la geotermia dentro de sus políticas energéticas. No es así en el caso de Chile, donde hoy en día la exploración geotérmica está en manos de privados y el apoyo estatal a estas empresas no parece ser todo lo satisfactorio que ellas desearían. El cuarto requisito para el desarrollo de la geotermia tiene que ver con la existencia de un marco regulatorio claro, que permita desarrollar programas de exploración y explotación geotérmica en el contexto real de Chile. Si bien se hizo una modificación a la ley de concesiones, y se están llegando a acuerdos políticos entre los diferentes grupos parlamentarios para destrabar algunas de las barreras legales existentes, la realidad es que el marco regulatorio actual no es aún muy favorable para un óptimo desarrollo de la geotermia, aunque parece que las nuevas reglamentaciones apuntan a facilitar el camino. De hecho, el proyecto 20/20 (alcanzar en el año 2020 el 20% de la matriz energética mediante ERNC) se modificó recientemente a la Ley 20/25 (difusión pública realizada por el senador Orpi en Arica, el 28 de junio del presente año, en el marco del seminario “Nuevas tendencias de las Energías Renovables en la Región de Arica y Parinacota”), mediante la cual, y con el acuerdo de todas las fuerzas políticas, se insta a que en el año 2025 el 20% de la matriz energética chilena provenga de las ERNC y, sin lugar a dudas, se espera que la geotermia aporte un buen porcentaje. Según estimaciones del Ministerio de Energía, para el año 2025 o 2030 Chile debiera contar con 1.000 a 1.500 MW operativos procedentes de la geotermia. De ser esto real, en la próxima década, Chile debiera ser entonces uno de los diez principales países del mundo en producción de electricidad mediante geotermia.

Otro problema que va a enfrentar el desarrollo de la geotermia en el país tiene que ver con la ausencia de equipos de perforación profunda para la exploración y desarrollo de la energía geotérmica, lo que permite suponer una baja actividad de desarrollo en los próximos años. Si bien Chile es un país minero, no existe la experiencia en perforaciones profundas, al no ser un país petrolero. Además, todas las concesiones geotérmicas en el norte de Chile están ubicadas en el altiplano o en la alta cordillera, en alturas por lo general sobre los 4.000 m, y muy alejadas del SING. Esta lejanía de las concesiones tiene tres principales inconvenientes. Por un lado, se encarecen los costos de perforación, por otro lado, aumentan los costos al tener que incorporar los costos de transmisión desde la planta hasta el SING y, finalmente, las plantas estarán lejos de núcleos urbanos importantes, aunque próximas a zonas con desarrollo minero, que podrían convertirse en los principales clientes de la energía generada. También las concesiones del centro y sur del país presentan problemas geográficos, ya que se encuentran en zonas altas de la cordillera (2.000 a 3.000 m), donde durante gran parte del año están cubiertas de nieve,

dificultando los accesos y condiciones de trabajo en terreno. Sin embargo, a diferencias de las concesiones ubicadas en el norte de Chile, las del centro-sur se encuentran más “cercanas” a la línea de transmisión del SIC y más próximas a grandes núcleos urbanos.

Finalmente, una nueva iniciativa desde el Ministerio de Energía podría ayudar a superar otra de las barreras que tiene el desarrollo de la geotermia: el de la incertidumbre y el riesgo geológico. En este sentido, el 7 de agosto del presente año, se publicó en el diario electrónico *BNameicas*¹ la intención del Ministerio de lanzar un programa de seguro de perforación fallida y financiamiento para proyectos geotérmicos en el 2014. Se estaría, entonces, creando un fondo junto al BID y el Banco Mundial para crear un seguro de perforación fallida tendiente a mitigar parte de los riesgos asociados a las perforaciones exploratorias.

REFLEXIONES FINALES

Sin lugar a dudas, Chile tiene un alto potencial geotérmico que aún no se ha desarrollado. Las condiciones geológicas de Chile son excepcionales para pensar en el desarrollo de la geotermia. El país tiene cientos de volcanes, y si bien el potencial geotérmico del país es desconocido, este es uno de los mayores del mundo, lo que permitiría la generación de electricidad limpia y amigable con el medio ambiente. Por otro lado, siempre que se habla del potencial geotérmico de Chile se le asocia a sistemas geotérmicos relacionados con centros volcánicos activos. Pero es conocido que existen otros sistemas geotérmicos en los que este volcanismo activo no está presente, por lo que es posible que las estimaciones de potencial geotérmico realizadas inicialmente por A. Lahsen de 16.000 MW sean “conservadoras”, ya que estos cálculos (y los que actualmente se están desarrollando en el CEGA) consideran únicamente sistemas geotermiales asociados a volcanismo. En este sentido, no hay que olvidarse de países como Alemania, con un potencial geotérmico instalado del orden de los 7 MW para generación de electricidad a partir de sistemas geotermiales no relacionados con volcanismo activo.

Chile tiene una oportunidad única para diversificar su matriz energética mediante ERNC. Para ello, todos los actores involucrados deben unirse para llegar a un buen fin. El papel de la academia debe estar muy claramente delimitado. En este sentido, la Universidad de Chile, junto con las otras universidades que participan en el CEGA (Pontificia Universidad Católica de Chile, como institución asociada, y las universidades Católica del Norte, de Atacama y de Concepción, con la participación de investigadores), deben jugar un papel fundamental en la formación de los nuevos geocientistas e ingenieros, que serán los responsables del desarrollo de las plantas geotérmicas en el país, además de generar conocimiento de base que permita definir modelos para los sistemas geotermiales andinos que faciliten el proceso de exploración y explotación.

1. Daugherty, A., “Chile pretende lanzar seguro geotérmico y obtener financiamiento el 2014”, en *BNameicas*, 7 agosto 2013. Véase <http://www.bnameicas.com/news/energiaelectrica/chile-pretende-lanzar-seguro-geotermico-y-obtener-financiamiento-el-2014>

Además, nuestra misión también tiene una importante rama social: hay que trabajar con las comunidades, ya que estas deben estar involucradas en los proyectos geotérmicos. No hay que inventar la rueda. Hay que mirar los ejemplos exitosos como el de Nueva Zelanda, donde las comunidades maories están involucradas en los proyectos geotérmicos desde sus inicios. ¡Aprendamos las buenas prácticas!

Nos queda un camino interesante. Estoy convencido de que en los próximos años podremos decir que sí, que después de un siglo, en Chile se genera electricidad mediante geotermia. Hablaremos en unos años más del uso directo de la geotermia para calefacción distrital, secaderos de leña, invernaderos, etc. Chile se convertirá en un país geotérmico, mucho más amigable con el medio ambiente y con una mayor independencia energética.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realiza en el marco de las actividades del Proyecto FONDAP de CONICYT 15090013 Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA). Agradezco sinceramente al Prof. Alfredo Lahsen toda la ayuda prestada en estos dos años de existencia del CEGA, así como el compartir conmigo muchas de sus experiencias iniciales de investigación en geotermia en Chile. Igualmente, quiero agradecer a todos y cada uno de los investigadores del CEGA, incluyendo estudiantes de pre y postgrado, sin cuyo aporte y dedicación, este centro de investigación no podría desarrollarse.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alam, M.A., Sánchez, P., Parada, M.A., “Interplay of volcanism and structural control in defining the geothermal system(s) along the Lliquiñe-Ofqui Fault Zone, in the south-central Chile”, en *GRC Transactions*, Vol. 34, 2010, pp. 747-750.
- Bertani, R., “Geothermal power generation in the world 2005–2010 update report”, en *Geothermics*, Vol. 41, 2012, pp. 1-29.
- Brüggen, J., *Informe geológico sobre los géiseres Volcanes del Tatio*, Ministerio de Fomento, Departamento de Minas y Petróleo, informe inédito, 1940, 18 págs.
- Cataldi, R., Hodgson, S.F., Lund, J.W. (editores), *Stories from a Heated Earth. Our geothermal heritage*, Geothermal Research Council & International Geothermal Association, 1999, 569 págs.
- Escenarios Energéticos Chile 2030, *Visiones y temas clave para la matriz eléctrica*, Comité Técnico de la Plataforma Escenarios Energéticos 2030, 109 págs.
- Francis, P., *Volcanoes. A planetary perspective*, Oxford University Press, 1995, 443 págs.
- Grunder, A.L., Thompson, J.M., Hildreth, W., “The hydrothermal system of the Calabozos caldera, central Chilean Andes”, en *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 32, 1987, pp. 71-81.
- Hauser, A., “Catastro y caracterización de las fuentes de aguas minerales y termales de Chile”, en *Boletín*, N° 50, SERNAGEOMIN, 1997, 90 págs.

- Lahsen, A., “Geothermal exploration in Northern Chile-Summary. Circum-Pacific Energy and Mineral Resources”, en *Memoir*, N° 25, AAPG, 1976, pp. 169-175.
- “Origen y potencial de energía geotérmica en los Andes de Chile”, en Frutos, J., Oyarzún, R., Pincheira, M. (eds.), *Geología y Recursos Minerales de Chile*, Universidad de Concepción, 1986, pp. 423-438.
- “Chilean Geothermal Resources and their possible utilization”, en *Geothermics*, Vol. 17, 1988, pp. 401-410.
- Lahsen, A., Sepúlveda, F., Rojas, J., Palacios, C., “Present Status of Geothermal Exploration in Chile”, en *Proceedings World Geothermal Congress*, Antalya, Turkey, 2005.
- Lahsen, A., Muñoz, N., Parada, M.A., “Geothermal Development in Chile”, en *Proceedings World Geothermal Congress*, Bali, Indonesia, 2010.
- Lund, J.W., Freeston, D.H., Boyd, T.L., “Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review”, en *Geothermics*, Vol. 40, 2011, pp. 159-180.
- Sánchez, P., Morata, D., Lahsen, A., Parada, M.A., “Current Status of Geothermal Exploration in Chile and the Role of the new Andean Geothermal Center of Excellence (CEGA)”, en *Geothermal Research Council (GRC) Transactions*, Vol. 35, 2011, pp. 1215-1218.
- Sánchez, P., Pérez-Flores, P., Arancibia, G., Cembrano, J., Reich, M., “Crustal deformation effects on the chemical evolution of geothermal systems: the intra-arc Liquiñe-Ofqui fault system, Southern Andes”, en *International Geology Review*, DOI:10.1080/00206814.2013.775731, 2013.
- Sepúlveda, F., The “Cordón Caulle Geothermal System: Geological and Geochemical Characterization”, tesis doctoral, Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile, 2006, 290 págs.
- Sepúlveda, F., Dorsch, K., Lahsen, A., Bender, S., Palacios, C., “Chemical and isotopic composition of geothermal discharges from the Puyehue - Cordón Caulle area (40.5 S), Southern Chile”, en *Geothermics*, Vol. 33, 2004, pp. 655-673.
- Sepúlveda, F., Lahsen, A., Bonvalot, S., Cembrano, J., Alvarado, A., Letelier, P., “Morphostructural evolution of the Cordón Caulle geothermal region, Southern Volcanic Zone, Chile: insights from gravity and Ar-Ar dating”, en *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 148, 2005a, pp. 165-189.
- Sepúlveda, F., Lahsen, A., Dorsch, K., Palacios, C., Bender, S., “Geochemical exploration in the Cordón Caulle geothermal region, Southern Chile”, en *Proceedings of the World Geothermal Congress 2005*, (CD Volume), Antalya, Turkey, Paper N° 0818, 2005b, pág. 9.
- Sepúlveda, F., Lahsen, A., Powell, T., “Gas geochemistry of the Cordón Caulle geothermal system, Southern Chile”, en *Geothermics*, Vol. 36, 2007, pp. 389-420.
- SERNAGEOMIN, *Reglamento identifica fuentes probables de energía geotérmica*, Decreto N° 142, Ministerio de Minería de Chile, 2000.
- Soffia, J., Clavero, J., “Doing geothermal exploration business in Chile, Energía Andina experience”, en *Geothermal Research Council (GRC) Transactions*, Vol. 34, 2010, pp. 637-641.
- Stern, C.R., Moreno, H., López-Escobar, L., Clavero, J.E., Lara, L.E., Naranjo, J.A., Parada, M.A., Skewes, M.A., “Chilean volcanoes”, en T. Moreno, T., Gibbons, W. (eds.), *The Geology of Chile*, The Geological Society, 2007, pp. 147-178.
- Tocchi, E., *Il Tatio*, *Ufficio Geológico Larderello SpA.*, informe inédito, 1923, 32 págs.