

DOCUMENTOS DE PROYECTO

Valoración y gobernanza de los proyectos geotérmicos en América del Sur

Una propuesta metodológica

Paolo Bona
Manlio F. Coviello



DOCUMENTOS
DE PROYECTO

Valoración y gobernanza de los proyectos geotérmicos en América del Sur

Una propuesta metodológica

Paolo Bona
Manlio F. Coviello



Este documento fue preparado por Paolo Bona, Consultor Senior en Geotermia de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y por Manlio F. Coviello, Jefe de la Unidad de Recursos Naturales y Energía de la CEPAL.

Los trabajos se desarrollaron en el marco de las actividades del proyecto de cooperación entre la CEPAL y el Gobierno de Alemania "Energías sostenibles en América Latina y el Caribe" (GER/14/003).

La información incluida en el presente documento ha sido en su mayoría obtenida de fuentes bibliográficas de acceso público. Sin embargo, la definición de elementos históricos y situacionales sobre la geotermia en cada país no hubiera sido posible sin la colaboración prestada por algunos destacados profesionales y especialistas, a saber: Claudia Alfaro (Colombia), Eduardo Aguilera (Ecuador), Vicentina Cruz (Perú), Carlos Felipe Ramírez (Chile), Franco Urbani (República Bolivariana de Venezuela). Agradecemos también a la empresa Energy Development Corporation (EDC) por responder a un formulario de encuesta enviado a los principales desarrolladores geotérmicos activos en Chile.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de la Organización.

Índice

Antecedentes.....	9
Resumen	11
Introducción	13
A. Historia y situación actual de la geotermia en América Latina	13
I. La geotermia en América del Sur: enfoque y perspectivas	23
A. Argentina	26
1. Reseña histórica de la investigación geotérmica	26
2. Marco legal	27
3. Principales proyectos geotérmicos.....	28
4. Potencial geotermo-eléctrico	34
5. Situación actual y perspectivas de desarrollo	34
B. Estado Plurinacional de Bolivia.....	35
1. Reseña histórica de la investigación geotérmica	35
2. Marco legal	36
3. Principales proyectos geotérmicos.....	36
4. Potencial geotermo-eléctrico	41
5. Situación actual y perspectivas de desarrollo	41
C. Chile	42
1. Reseña histórica de la investigación geotérmica	42
2. Marco legal	44
3. Principales proyectos geotérmicos.....	46
4. Potencial geotermo-eléctrico	59
5. Situación actual y perspectivas de desarrollo	60
D. Colombia	61
1. Reseña histórica de la investigación geotérmica	61
2. Marco legal	63
3. Principales proyectos geotérmicos.....	64
4. Potencial geotermo-eléctrico	72
5. Situación actual y perspectivas de desarrollo	72
E. Ecuador	74
1. Reseña histórica de la investigación geotérmica	74
2. Marco legal	76
3. Principales proyectos geotérmicos.....	77

4.	Potencial geotermo-eléctrico	81
5.	Situación actual y perspectivas de desarrollo	82
F.	Perú	83
1.	Reseña histórica de la investigación geotérmica	83
2.	Marco legal	84
3.	Principales proyectos geotérmicos	85
4.	Potencial geotermo-eléctrico	94
5.	Situación actual y perspectivas de desarrollo	94
G.	República Bolivariana de Venezuela	95
1.	Reseña histórica de la investigación geotérmica	95
2.	Marco legal	95
3.	Principales proyectos geotérmicos	96
4.	Potencial geotermo-eléctrico	97
5.	Situación actual y perspectivas de desarrollo	97
II.	Base de datos de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur	99
A.	Selección de proyectos	99
B.	Estructura de la base de datos	101
1.	Identificación del proyecto	101
2.	Situación legal y administrativa	102
3.	Etapas de desarrollo	102
4.	Características y ubicación del recurso	103
5.	Entorno institucional, ambiental y de mercado	105
6.	Referencias	107
C.	Base de datos	108
III.	Características del sector geotermo-eléctrico de América del Sur	115
A.	Situación regional	115
1.	Estado de la investigación geotérmica	115
2.	Estado de actividad y tenencia de proyectos	118
3.	Características de los recursos geotérmicos	120
4.	Potencial del recurso geotérmico	122
5.	Condiciones físicas y logísticas de las áreas geotérmicas	124
6.	Contexto institucional y regulatorio	127
7.	Condiciones de mercado	128
8.	Contexto social y ambiental	130
B.	Evaluación y clasificación de proyectos	132
1.	Criterios de evaluación	132
2.	Clasificación de proyectos	140
IV.	Consideraciones finales	147
	Bibliografía	153
	Anexo Base de datos de proyectos geotermo-eléctrico de América del Sur	
	Referencias y listado de citas bibliográficas	164

Cuadros

Cuadro 1	Principales características geotérmicas de los países andinos	25
Cuadro 2	Áreas geotérmicas con perspectivas de desarrollo eléctrico de Argentina	28
Cuadro 3	Áreas geotérmicas con perspectivas de desarrollo eléctrico del Estado Plurinacional de Bolivia	38
Cuadro 4	Áreas geotérmicas con perspectivas de desarrollo eléctrico de Chile	47
Cuadro 5	Áreas geotérmicas con perspectivas de desarrollo eléctrico de Colombia	65
Cuadro 6	Áreas geotérmicas con perspectivas de desarrollo eléctrico de Ecuador	78
Cuadro 7	Áreas geotérmicas con perspectivas de desarrollo eléctrico de Perú	87

Cuadro 8	Áreas geotérmicas con perspectivas de desarrollo eléctrico de Venezuela	96
Cuadro 9	Base de datos de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur	108
Cuadro 10	Base de datos de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur	109
Cuadro 11	Base de datos de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur Etapa de desarrollo	110
Cuadro 12	Base de datos de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur. Características y ubicación del Recurso. Colombia-Ecuador- Perú-República Bolivariana de Venezuela	111
Cuadro 13	Base de datos de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur. Entorno institucional, ambiental y de mercado. Argentina-Chile	112
Cuadro 14	Base de datos de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur. Entorno institucional, ambiental y de mercado. Colombia-Ecuador- Perú- República Bolivariana de Venezuela	113
Cuadro 15	Estado de preparación de los proyectos	118
Cuadro 16	Criterios de clasificación de los proyectos	133
Cuadro 17	Clasificación de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur. Proyectos en etapa anterior a la factibilidad. Clasificación de características y ubicación del recurso. Argentina, Estado Plurinacional de Bolivia, Chile, Colombia, Ecuador	135
Cuadro 18	Clasificación de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur. Proyectos en etapa anterior a la factibilidad. Clasificación de características y ubicación del recurso. Perú y República Bolivariana de Venezuela	136
Cuadro 19	Clasificación de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur. Proyectos en etapa anterior a la factibilidad. Clasificación de entorno institucional, ambiental y de mercado. Argentina, Estado Plurinacional de Bolivia, Chile, Colombia, Ecuador	137
Cuadro 20	Clasificación de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur. Proyectos en etapa anterior a la factibilidad. Clasificación de entorno institucional, ambiental y de mercado. Perú y República Bolivariana de Venezuela	138
Cuadro 21	Clasificación de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur. Proyectos en etapa de factibilidad o desarrollo. Clasificación de características y ubicación del recurso	139
Cuadro 22	Clasificación de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur. Proyectos en etapa de factibilidad o desarrollo. Entorno institucional, ambiental y de mercado	139
Cuadro 23	Viabilidad de los proyectos y capacidad geotermo-eléctrica desarrollable	151
Cuadro 24	Potencial desarrollable en el corto mediano plazo por país	152
 Gráficos		
Gráfico 1	Evolución de la capacidad geotermo-eléctrica instalada en el mundo	14
Gráfico 2	Evolución de la capacidad geotermo-eléctrica instalada en el mundo y en América Latina, 1970-2015	15
Gráfico 3	Distribución por país de los proyectos geotérmicos seleccionados	101
Gráfico 4	Distribución de proyectos en función de la etapa de desarrollo	116
Gráfico 5	Distribución de pozos perforados según tipología	117
Gráfico 6	Distribución de pozos perforados según tipología y por país	117
Gráfico 7	Distribución de proyectos por estado de actividad	119
Gráfico 8	Distribución de proyectos por tenencia	119
Gráfico 9	Distribución de proyectos según situación concesional-administrativa	120
Gráfico 10	Clasificación de proyectos en función de tipo de sistema geotérmico	120
Gráfico 11	Clasificación de proyectos en función de la edad del vulcanismo	121
Gráfico 12	Clasificación de proyectos en función de la temperatura del recurso	121
Gráfico 13	Estimación de potencial instalable por país en corto-mediano plazo	123

Gráfico 14	Distribución de proyectos por potencial instalable estimado.....	123
Gráfico 15	Distribución de proyectos en función de la elevación del sitio.....	124
Gráfico 16	Distribución de proyectos en función de las condiciones climáticas del sitio.....	124
Gráfico 17	Distribución de proyectos en función de las características topográficas del área.....	125
Gráfico 18	Distribución de proyectos en función de la accesibilidad.....	126
Gráfico 19	Distribución de proyectos en función de la distancia de la red eléctrica.....	126
Gráfico 20	Clasificación de proyectos según el marco institucional y regulatorio.....	127
Gráfico 21	Clasificación de proyectos según condiciones de mercado-precio de energía.....	128
Gráfico 22	Clasificación de proyectos según condiciones de mercado. Condiciones contratos PPA.....	129
Gráfico 23	Clasificación de proyectos según condiciones de mercado. Incentivos económico.....	130
Gráfico 24	Clasificación de proyectos según condiciones del contexto social.....	131
Gráfico 25	Clasificación de proyectos según presencia de restricciones ambientales.....	132
Gráfico 26	Proyectos en etapa anterior a la factibilidad. Clasificación según el puntaje total del recurso.....	140
Gráfico 27	Proyectos en etapa anterior a la factibilidad. Clasificación según el puntaje total del entorno.....	141
Gráfico 28	Proyectos en etapa anterior a la factibilidad. Clasificación según el puntaje global del recurso y del entorno.....	141
Gráfico 29	Proyectos en etapa de factibilidad o desarrollo. Clasificación según el puntaje total del recurso.....	142
Gráfico 30	Proyectos en etapa de factibilidad o desarrollo. Clasificación según el puntaje total del entorno.....	142
Gráfico 31	Proyectos en etapa de factibilidad o desarrollo. Clasificación según el puntaje global del recurso y del entorno.....	142
 Diagramas		
Diagrama 1	Distribución de la producción estimada de energía renovable en el mundo a finales de 2014.....	18
Diagrama 2	Costos y riesgos de un proyecto geotérmico en sus etapas de desarrollo.....	19
Diagrama 3	Principales actores del proceso geotérmico.....	20
Diagrama 4	Proyectos en etapa anterior a la factibilidad. Componente recurso. Características del recurso vs. condiciones del sitio.....	143
Diagrama 5	Proyectos en etapa anterior a la factibilidad. Componente entorno. Contexto regulatorio, institucional y de mercado vs. aspectos sociales y ambientales.....	143
Diagrama 6	Proyectos en etapa de factibilidad o desarrollo. Componente recurso. Características del recurso vs. condiciones del sitio.....	143
Diagrama 7	Proyectos en etapa de factibilidad o desarrollo. Componente entorno. Contexto regulatorio, institucional y de mercado vs. aspectos sociales y ambientales.....	144
Diagrama 8	Proyectos en etapa anterior a la factibilidad. Evaluación integrada recurso vs. entorno.....	144
Diagrama 9	Proyectos en etapa de factibilidad o desarrollo. Evaluación integrada recurso vs. entorno.....	145
 Mapas		
Mapa 1	Límites de placas tectónicas y distribución de provincias geotérmicas de alta temperatura.....	14
Mapa 2	Plantas geotermo-eléctricas en operación en el mundo.....	15

Mapa 3	Distribución del recurso geotérmico en América del Sur.....	24
Mapa 4	Distribución de volcanes cuaternarios en América del Sur	25
Mapa 5	Zonificación geotérmica de Argentina y ubicación de los principales proyectos con perspectivas de desarrollo geotermo-eléctrico	29
Mapa 6	Provincias geológicas de Bolivia y ubicación de los principales proyectos con perspectivas de desarrollo geotermo-eléctrico	37
Mapa 7	Ubicación de los principales proyectos con perspectivas de desarrollo geotermo-eléctrico en Chile	48
Mapa 8	Ubicación de los principales proyectos con perspectivas de desarrollo geotermo-eléctrico en Colombia	66
Mapa 9	Áreas geotérmicas de Ecuador y ubicación de los principales proyectos con perspectivas de desarrollo geotermo-eléctrico	78
Mapa 10	Regiones geotérmicas del Perú y potencial geotérmico del Perú	86
Mapa 11	Áreas geotérmicas de Perú y ubicación de los principales proyectos con perspectivas de desarrollo geotermo-eléctrico	87
Mapa 12	Ubicación de la zona de mayor interés geotérmico de la República Bolivariana de Venezuela; El Pilar - Casanay, Estado Sucre	97
Mapa 13	Ubicación de los proyectos geotérmicos seleccionados	100

Antecedentes

La discusión global generada por la adopción, en septiembre 2015, de los objetivos de la Agenda de Desarrollo 2030 de la ONU, ha puesto en evidencia la importancia de considerar las realidades y prioridades nacionales y regionales en la definición de los elementos que compondrían una “economía baja en carbono”.

En este sentido, América Latina y el Caribe enfrentan déficits persistentes en la prestación de servicios energéticos, agravados por el crecimiento demográfico, la alta concentración de población en áreas urbanas y formas cada vez más insostenibles de uso de la tierra.

En varias zonas de la región, la falta de acceso equitativo y de calidad a la energía es uno de los factores principales que perpetúan la pobreza y la desigualdad, además de que provocan una mayor contaminación y un uso ineficiente de los recursos energéticos. Las formas insostenibles de uso de la tierra y el aumento de la vulnerabilidad urbana también contribuyen a perpetuar la pobreza, la desigualdad y la degradación de los recursos energéticos. Y la transición demográfica anticipa que las presiones podrán intensificar esta tendencia.

En este sentido, un aprovechamiento y uso sostenible de los abundantes recursos energéticos renovables que posee América Latina y el Caribe, puede contribuir significativamente a superar las barreras al desarrollo, no solo en términos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero sino también porque contribuye al mejoramiento de la productividad de las economías de la región, de la inclusión social, del bienestar y de la gobernabilidad.

En este sentido, la estrategia de CEPAL —presentada en el Documento de su último Período de Sesiones, celebrado en Lima en Mayo 2014— es apoyar a los países de la Región a levantar dichas barreras, diseñando e implementando instrumentos de políticas en diferentes esferas, como las políticas-económicas, las regulatorias e institucionales, las tecnológicas, las financieras y las sociales.

En los últimos años, la CEPAL ha venido promoviendo una visión moderna e integradora sobre las energías “bajas en carbono”, incorporando nuevos ámbitos y enfoques —como lo son la innovación, el intercambio tecnológico, las asociaciones Públicos-Privadas, etc.— que permitan un aprovechamiento sostenible y sostenido de los cuantiosos recursos renovables de América Latina y el Caribe. Y en este sentido, la geotermia es sin duda uno de los principales y más abundantes recursos energéticos renovables de los que dispone la Región.

Resumen

La evidencia demuestra que —muy particularmente en los países suramericanos— la geotermia ha quedado rezagada durante muchos años, no obstante diferentes iniciativas de fomento que han estado surgiendo a nivel de cada país y de parte de organismos financieros internacionales.

De hecho, dichas iniciativas pueden representar —desde el punto de vista potencial— una etapa crucial y con un fuerte efecto transformador para el desarrollo de la geotermia en América del Sur, si es que oportunamente orientadas y gestionadas. En este contexto, la promoción inicial de proyectos emblemáticos, de menor riesgo técnico y de mayor viabilidad en el entorno territorial, ambiental, político, socio-cultural y de mercado, constituye un elemento fundamental por el efecto demostrativo y catalizador que estos proyectos pueden generar.

Para lograr este objetivo es de fundamental importancia contar con un conocimiento detallado de la situación en los diferentes países suramericanos, con identificación de los prospectos geotérmicos más atractivos y viables, para orientar cualquier iniciativa de apoyo organizativo, técnico y financiero.

El presente documento contiene un análisis de la situación del sector geotérmico en América del Sur, enfocado en la generación geotermo-eléctrica, con identificación de los principales proyectos y con evaluación de todos los factores que los caracterizan, desde el punto de vista histórico, del recurso, de su accesibilidad, y de las condiciones de entorno institucional, social, ambiental y de mercado.

Para tal fin se diseñó una metodología para la evaluación conjunta de todos los factores que caracterizan a un proyecto geotérmico en su integralidad, con el objetivo de proveer una herramienta de clasificación y comparación racional, que permita minimizar la subjetividad en las evaluaciones.

Considerando además la situación dinámica del sector y de cada proyecto, se concibió una base de datos y un sistema de clasificación con una estructura que se presta a ser fácilmente ajustada, para facilitar sucesivas actualizaciones y adaptaciones a las múltiples necesidades de análisis que puedan surgir en el sector. El objetivo final es generar una “instantánea” del sector geotérmico en América del Sur, enfocada en una selección de prospectos que —independientemente del tipo y calidad del recurso— cuentan con características suficientemente documentadas y perspectivas concretas para convertirse en proyectos de desarrollo geotermo-eléctrico comercial.

El producto final identifica las fortalezas y debilidades de factores-clave para el desarrollo, como son el recurso, las condiciones del sitio y el entorno ambiental, social, institucional y de mercado. Se espera que este documento genere una base de referencia que pueda contribuir concretamente a orientar iniciativas de promoción y fomento del sector geotermo-eléctrico en América del Sur.

Introducción

A. Historia y situación actual de la geotermia en América Latina¹

La utilización de recursos geotérmicos para generación de electricidad celebró su centenario en 2014. En 1904, en Larderello (Italia) el Príncipe Piero Ginori Conti ideó y realizó el primer experimento de generación eléctrica utilizando vapor geotérmico. Logró generar una pequeña cantidad de energía con una máquina de vapor a pistón de 0,4 kWe, suficiente para encender cinco bombillas, pero el éxito obtenido abrió el camino al desarrollo comercial de la geotermo-electricidad, que se concretizó en 1913 con la entrada en operación de la primera planta con una turbina de vapor de 250 kWe. Treinta años después, en vísperas de la segunda guerra mundial, la industria geotermo-eléctrica en Larderello se había exitosamente consolidado, alcanzando una capacidad instalada de 127 MWe en 1942².

La experiencia italiana despertó pronto el interés para la geotermo-electricidad en otros países. Nueva Zelanda empezó en 1918 a interesarse en los emprendimientos geotérmicos italianos y en posibles aplicaciones en su territorio, Japón perforó sus primeros pozos geotérmicos en Beppu en 1919, Estados Unidos realizó perforaciones en The Geysers en 1921 e instaló una planta geotérmica experimental de 20 kWe, que operó entre 1925 y 1958.

En América Latina, Chile fue también parte en esa labor pionera, con la ejecución de estudios y perforaciones en la zona termal de El Tatio entre 1921 y 1923, con la colaboración de técnicos italianos. El objetivo era la generación de electricidad para las florecientes industrias mineras atacameñas y los estudios realizados en ese entonces llevaron a una estimación de capacidad de generación eléctrica de 50 MW (Tocchi, 1923). Sin embargo el proyecto no prosperó.

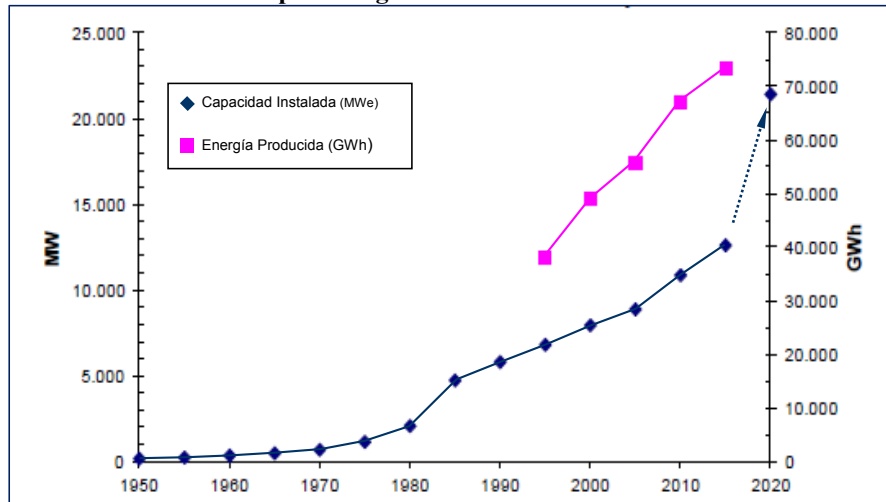
Fue hasta después de la segunda guerra mundial, a finales de los años '50, que la utilización de recursos geotérmicos para generación de electricidad logró iniciar efectivamente su expansión fuera de la cuna italiana. Entre 1954 y 1958 entraron en operación las primeras plantas en Nueva Zelanda, en Kawerau y Wairakei, en 1958 una pequeña planta experimental en Pathé, México, y en 1960 la primera planta en el campo de The Geysers, en Estados Unidos. A continuación muchas

¹ En falta de mención específica, los datos históricos mencionados en este capítulo derivan de varios libros, publicaciones y sitios web científicos y divulgativos; en particular: Bolton, 2004; Bruni, 2014a; CleanEnergyIdeas, 2013; Dickson y Fanelli, 2003; Lahsen, 2005; Sommaruga, 2010; entre otros.

² Larderello e la sua storia (<http://www.larderellomare.it/geotermia/geo/Larderello%20e%20la%20Geotermia.htm>).

otras naciones se fueron progresivamente sumando hasta llegar a la situación actual, en la cual la energía geotérmica es utilizada para generación de electricidad en 26 países, con una capacidad instalada global de casi 13 GWe (gráfico 1). La capacidad individual instalada varía entre 0,1 MWe en Rumanía y Taiwan y 3.450 MWe en Estados Unidos (Bertani, 2015).

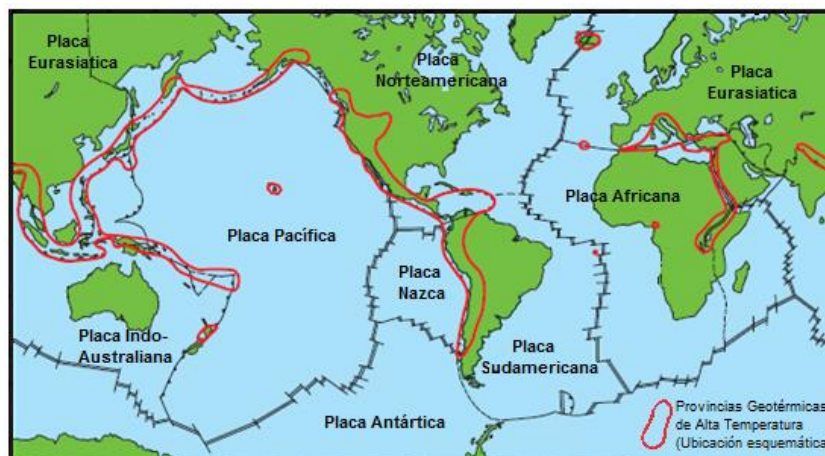
Gráfico 1
Evolución de la capacidad geotermo-eléctrica instalada en el mundo



Fuente: Bertani, 2015 (modificado).

Como se puede observar en el gráfico 1 el crecimiento de la capacidad geotermo-eléctrica instalada ha sido paulatino hasta inicios de los años 70, luego la primera crisis mundial del petróleo de 1973 indujo por primera vez muchos países a interesarse en recursos energéticos alternativos a los hidrocarburos, impulsando el crecimiento del sector geotérmico. La geotermia, con sus ventajas de recurso autóctono, generación de carga base y modestos impactos ambientales, se volvió en un tema de particular interés en los países con características geológicas apropiadas para la existencia de recursos de alta temperatura, es decir en las regiones ubicadas en correspondencia de márgenes de placas tectónicas y afectadas por vulcanismo reciente (mapa 1).

Mapa 1
Límites de placas tectónicas y distribución de provincias geotérmicas de alta temperatura



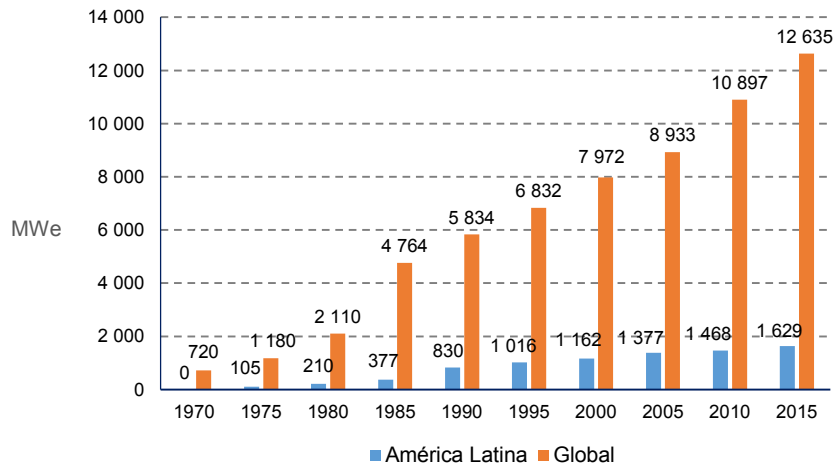
Fuente: EGI - University of Utah, 2001 (modificado).

Nota: Los límites y los nombres que figuran en este mapa no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

América Latina, con su excelente ubicación a lo largo del cinturón volcánico circumpacífico, no quedó atrás. En los años '70 y '80, con el apoyo técnico y financiero de varias instituciones y organismos internacionales, los gobiernos de la mayoría de países centroamericanos y andinos se

dedicaron a la investigación de sus territorios en búsqueda de recursos geotérmicos. Los resultados no tardaron en llegar: México en 1973 y El Salvador en 1975, fueron los primeros países latinoamericanos en generar electricidad con fuentes geotérmicas; luego siguieron Nicaragua en 1983, Costa Rica en 1994 y Guatemala en 1998. Actualmente, América Latina cuenta con una capacidad geotermo-eléctrica instalada de 1.629 MWe (gráfico 2).

Gráfico 2
Evolución de la capacidad geotermo-eléctrica instalada en el mundo y en América Latina, 1970-2015



Fuente: Elaboración basada en datos tomados de Bertani, 2015, Bruni, 2014b, e investigación propia de los autores.

Es interesante observar que la capacidad geotermo-eléctrica instalada en América Latina, es decir en una de las regiones con condiciones geológicas más favorables para la explotación del recurso geotérmico (ver Mapa 1), corresponde solamente al 13% de la capacidad instalada mundial, y éste corresponde esencialmente a la subregión mesoamericana, ya que en América del Sur no existen plantas geotermo-eléctricas en operación (mapa 2).

Mapa 2
Plantas geotermo-eléctricas en operación en el mundo



Fuente: IGA Geothermal Energy Database³.

Nota: Los límites y los nombres que figuran en este mapa no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

³ http://repoigg.services.iit.cnr.it/SpagoBI/servlet/AdapterHTTP?PAGE=LoginPage&NEW_SESSION=TRUE.

Esto, a pesar de que en América del Sur los estudios realizados a partir de los años '70 han determinado en todos los países que abarcan a la Cordillera Andina (Colombia, Ecuador, Bolivia, Perú, Chile y Argentina) un significativo potencial geotérmico y han identificado varios proyectos muy prometedores. En algunos sitios, como Copahue (Argentina), Laguna Colorada (Bolivia) y El Tatio (Chile), las investigaciones y perforaciones realizadas ya en las décadas de los '70 y '80 llevaron a comprobar la existencia de importantes recursos pero, inclusive en estos casos más avanzados, los esfuerzos no lograron concretizarse con la instalación de plantas geotermo-eléctricas. El mayor avance se dio en Copahue con la instalación de una planta piloto de 0,67 MWe que operó entre 1988 y 1997, para luego ser abandonada.

A partir de finales de los años '90 los nuevos desafíos del sector energético asociados con el alza de precios de combustibles fósiles y la surgente problemática del cambio climático, generaron un nuevo y más determinado impulso hacia las energías renovables a nivel global. En cuanto a la geotermia, en los gráficos 1 y 2 se puede observar, a partir de 2005, un nuevo incremento en el crecimiento de la capacidad instalada a nivel mundial, pero en América Latina el impacto ha sido débil hasta ahora. América del Sur en particular, tampoco en esta ocasión ha logrado despegar con la geotermia.

En los países andinos, en los últimos 10-15 años, los gobiernos han retomado la atención hacia la geotermia, con iniciativas del sector público (Bolivia, Ecuador), mixtas público-privado (Argentina, Colombia) o creando marcos legales específicos para incentivar la inversión totalmente privada (Perú, Chile). Todo esto ha generado mucho interés y nuevas expectativas. En Chile, a partir del 2001, se otorgaron más de 80 concesiones de exploración geotérmica y unas 50 más están solicitadas (Santana, 2014); en Perú se otorgaron 32 autorizaciones de exploración y 70 siguen en trámite de autorización (Claro 2014); en Bolivia el Gobierno gestionó financiamientos con instituciones internacionales para concretar el desarrollo comercial en Laguna Colorada; en Argentina surgieron iniciativas geotérmicas de tipo PPP entre gobiernos provinciales y empresas privadas, y además el Gobierno del Neuquén intentó reactivar el desarrollo geotérmico ofreciendo en licitación pública internacional los campos de Copahue y Domuyo a inversionistas privados; en Ecuador el Gobierno retomó la investigación de las principales áreas geotérmicas mediante la empresa pública de electricidad; y en Colombia empresas públicas y público-privadas han iniciado proyectos de investigación de áreas geotérmicas con la asesoría de empresas consultoras extranjeras. Colombia y Ecuador han también renovado acuerdos para desarrollar conjuntamente el proyecto geotérmico binacional Tuffiño - Chiles - Cerro Negro.

Los resultados han sido hasta ahora globalmente modestos e intangibles, ya que a finales de 2015, casi un siglo después de los primeros intentos de desarrollo geotérmico en El Tatio (Tocchi, 1923), América del Sur ha ido mejorando el conocimiento de sus recursos, confirmando ulteriormente la existencia de un gran potencial geotermo-eléctrico, pero no tiene ninguna planta geotérmica en operación.

Las previsiones para el quinquenio 2015-2020, basadas en un análisis de los proyectos en fase de ejecución a nivel mundial (Bertani, 2015, ver gráfico 1), augura un sustancial crecimiento del sector geotermo-eléctrico, hasta superar los 21 GWe en 2020. Esto elevaría la reciente tasa de crecimiento anual promedio del 4% hasta aproximadamente el 14% en el quinquenio entrante. En América Latina las proyecciones de Bertani (2015) prevén la entrada en operación de aproximadamente 1.000 MWe adicionales, de los cuales solamente 150 MWe corresponden a proyectos en América del Sur. A la fecha, solamente uno de los proyectos considerados por Bertani (2015) para América del Sur ha iniciado actividades de construcción de planta (Cerro Pabellón, en Chile), mientras que varios de los restantes se encuentran todavía en fase de exploración del recurso. El riesgo de no cumplir con la ya limitada previsión para 2020 es por lo tanto significativo.

Esta situación ha llamado la atención de organismos internacionales y bancos multilaterales (Banco Mundial, BCIE, BID, CAF, JICA, IRENA, KfW, entre otros) que en los últimos años han iniciado a proveer programas de asistencia técnica a los gobiernos en América Latina y se han dedicado a la preparación de fondos de mitigación de riesgo para fomentar la inversión privada y pública en la exploración de recursos geotérmicos, así como a facilitar la movilización de capitales para las sucesivas fases de desarrollo de los proyectos (Sander, 2015).

Este esfuerzo parece ser el último recurso para destrabar la situación de la geotermia en América Latina y particularmente en América del Sur, pero el éxito de su implementación no puede prescindir de un conocimiento detallado y de una apropiada consideración de todos los factores involucrados. Estos factores son muy variados y no dependen solamente de los clásicos elementos “temperatura-fluido-permeabilidad” que caracterizan el recurso geotérmico, sino abarcan un amplio espectro de componentes del entorno territorial, ambiental, social, institucional, empresarial, financiero y del mercado energético, implicando varios niveles de influencia, internacional, nacional, regional y local. Los factores varían de país en país, y en cada país de proyecto en proyecto, determinando un complejo contexto de tipo “oferta-demanda” en el cual las expectativas de todas las partes involucradas tienen que ser cumplidas, en términos sociales, económicos y ambientales (Muñoz, 2015).

¿Por Qué 0 MW Geotérmicos en América del Sur?

La primera pregunta que surge al iniciar un análisis de la situación geotérmica en América del Sur es: ¿por qué, siendo la región muy rica en recursos geotérmicos, y después de tantos años de investigaciones, no existe ni una planta geotérmica en operación? Para comprender la situación es necesario analizar más ampliamente el contexto de la industria geotérmica y luego enfocar la lupa sobre el caso sudamericano.

La energía geotérmica es la fuente renovable casi perfecta para la generación de electricidad. Es un recurso totalmente autóctono, que no implica corte de forestas o extracción y transporte de sustancias minerales con los impactos secundarios asociados, no depende de factores climáticos, como vientos, insolación, regímenes de precipitaciones, tiene emisiones mínimas o nulas de dióxido de carbono y otros gases, no genera desechos contaminantes o radioactivos, no ocupa mucho espacio, no afecta sustancialmente al paisaje, no representa peligros para la fauna, las aves en particular, y en general causa impactos ambientales modestos y mitigables. La generación de electricidad geotérmica es una tecnología madura, que produce energía de carga base con factor de planta superior al 90% y, en ciertas condiciones, se presta también a modular la carga para acomodarse a variaciones de demanda (GEA, 2015). La geotermia es también una de las energías actualmente disponibles con los costos de generación más bajos, acompañados también por costos de operación mínimos, previsible y estables (IRENA, 2015; EIA, 2015)⁴. Ninguna otra fuente de energía actualmente disponible reúne tantas ventajas como la geotermia.

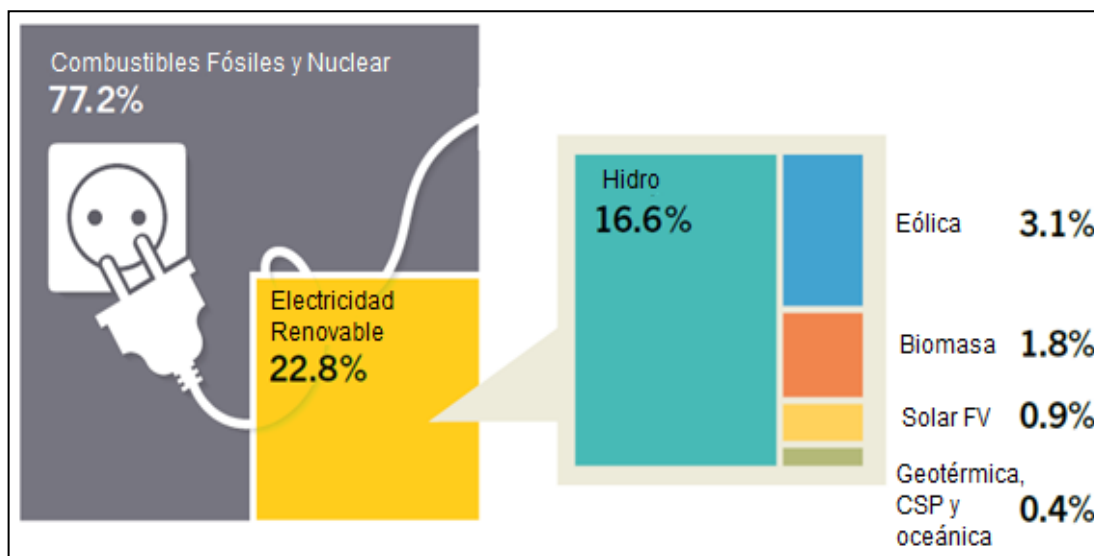
A pesar de esto la geotermia juega un papel marginal en el sector energético inclusive entre las energías renovables. Información publicada por el “Renewable Energy Policy Network for the 21st Century” (REN21, 2015) indica que la capacidad de generación de las energías renovables no convencionales a nivel mundial (excluyendo la hidroelectricidad⁵) es de 657 GWe de los cuales la geotermia representa 12,8 GWe, es decir el 1,95%. El diagrama 1 ilustra la contribución actual de la geotermia comparada con otras fuentes de energía en términos de energía eléctrica producida a nivel mundial.

⁴ En proyectos recientes, el costo normalizado (LCOE) de la energía geotérmica convencional varía entre 0,05 y 0,10 US\$/kWh. Los proyectos más competitivos, que utilizan recursos de muy buena calidad y con bajos riesgos de exploración, tienen un LCOE inclusive más bajo, alrededor de 0,04 US\$/kWh. Los desarrollos más complejos y de mayor riesgo, pueden alcanzar los 0,14 US\$/kWh (IRENA, 2015).

Los costos de operación y mantenimiento (O&M) de una planta geotérmica son muy bajos porque ésta no requiere de ningún combustible para funcionar. El “combustible” (vapor o agua caliente) viene asegurado, y prácticamente comprado de antemano, para toda la vida útil de la planta con la inversión inicial en exploración y perforación de pozos productores. Los costos O&M dependen de la ubicación, características y tamaño de la planta geotérmica y varían de 9US\$/MWh (para grandes centrales de condensación) a 25US\$/MWh (para pequeñas instalaciones binarias), excluyendo costos de perforación de pozos de reposición (IEA, 2010).

⁵ Incluyendo la hidroelectricidad, 1712 GW en total de renovables de los cuales la geotermia representa el 0.75%.

Diagrama 1
Distribución de la producción estimada de energía renovable en el mundo a finales de 2014



Fuente: REN21, 2015 (modificado).

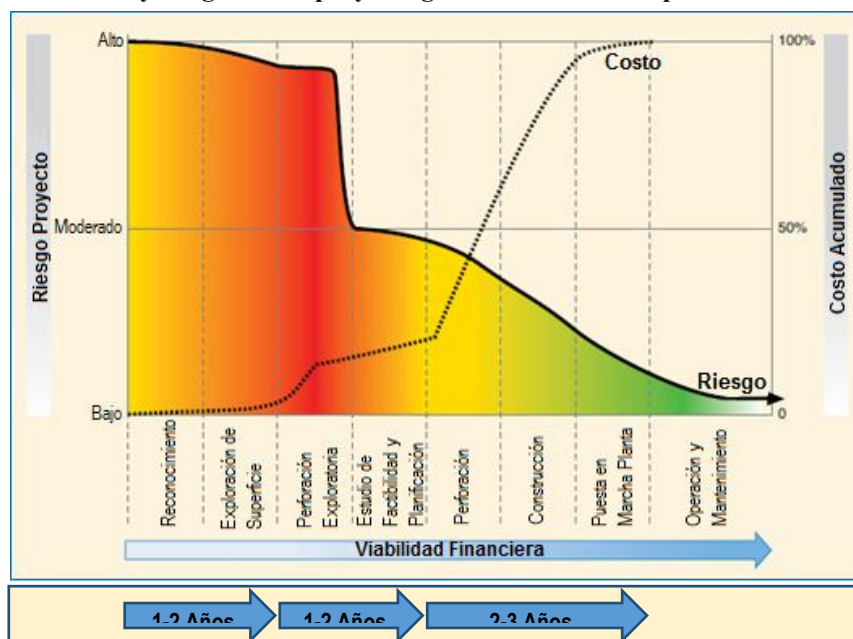
Las razones de esta situación de limitado desarrollo son múltiples y pueden resumirse en tres factores principales.

- i) Un primer factor relevante es que, contrariamente a otras fuentes renovables, como la eólica, la solar o la biomasa, amplias regiones en el mundo no cuentan con recursos geotérmicos aptos para generar electricidad. Si bien la geotermia es conceptualmente disponible en cualquier punto del planeta, en la práctica actual la explotación del recurso geotérmico para generación de electricidad es factible solamente en sitios donde coinciden condiciones geológicas particulares y elevado flujo de calor, para generar un campo geotérmico. Existen extensas regiones con condiciones favorables para la ocurrencia de este fenómeno (mapa 1), pero aún en estas zonas el recurso explotable no es ampliamente distribuido, sino está muy localizado y a menudo ubicado en zonas remotas, logísticamente difíciles y alejadas de los mayores centros de consumo de energía. Se espera que los desarrollos tecnológicos en curso para la creación artificial de sistemas geotérmicos en rocas calientes de baja o muy baja permeabilidad (Sistemas Geotérmicos Estimulados, o EGS por sus siglas en inglés), puedan en un futuro cercano ampliar la oferta de la geotermo-electricidad.
- ii) Otro factor relevante es que el desarrollo de un campo geotérmico es un proceso complejo, largo y muy desafiante desde el punto de vista técnico y financiero. El proceso implica varias etapas, desde la identificación del sitio mediante estudios de superficie, a la perforación de pozos exploratorios con significativa inversión de capital de alto riesgo, al desarrollo del campo de vapor y construcción de la planta geotermo-eléctrica, que implica una ulterior e intensa inversión inicial, siempre bajo ciertas condiciones de riesgo (diagrama 2)⁶. El tiempo necesario para completar todo el proceso en condiciones ideales es de unos 5-7 años, pero por diferentes razones muchos proyectos han requerido tiempos más largos para alcanzar la operación comercial.
- iii) Como consecuencia, son relativamente pocos los desarrolladores que tienen la capacidad técnica y financiera para operar en el sector geotérmico, movilizar los capitales necesarios y absorber los altos riesgos asociados. Dado el tamaño limitado del mercado,

⁶ El costo global de un proyecto geotérmico varía en función de las características del recurso, de su ubicación y de la tecnología de generación aplicada. Excluyendo casos particulares, el costo típico de un desarrollo geotermo-eléctrico varía a nivel mundial entre aproximadamente 2 y 5 MU\$/\$MWe instalado (IRENA, 2015).

los pocos desarrolladores existentes tienden también a concentrar sus operaciones en regiones seleccionadas, y a interesarse en los proyectos más avanzados y de menor riesgo, lo cual dificulta el crecimiento del sector mediante la exploración de nuevas áreas, donde los riesgos son más altos y los retornos económicos más inciertos. De hecho, muchos de los proyectos geotermo-eléctricos actualmente en operación en todo el mundo han sido desarrollados, o por lo menos iniciados, por instituciones públicas, o mediante una importante participación estatal (ESMAP, 2012). En América Latina, gran parte del desarrollo geotérmico actualmente alcanzado, y especialmente sus etapas iniciales de más alto riesgo, ha sido llevado a cabo por empresas estatales⁷. Luego, en varios casos se han implementado diferentes opciones de participación privada en las fases más avanzadas de desarrollo, instalación y operación de plantas geotérmicas⁸.

Diagrama 2
Costos y riesgos de un proyecto geotérmico en sus etapas de desarrollo



Fuente: ESMAP, 2012 (modificado).

- iv) El tercer factor se relaciona con las complejas interacciones que genera la explotación de un recurso natural —como la geotermia— con el entorno político, empresarial/corporativo, institucional, territorial, socio-cultural, ambiental y de los mercados energéticos y financieros. Dichas interacciones involucran a diferentes entidades en un proceso de tipo “oferta-demanda”, cuyo éxito está fuertemente vinculado al adecuado accionar de cada entidad y al cumplimiento de las expectativas de todos los

⁷ CFE en México, INDE en Guatemala, CEL (sucesivamente LaGeo) en El Salvador; ENEE en Honduras; INE y ENEL en Nicaragua; ICE en Costa Rica.

⁸ En Costa Rica, para la construcción de la Unidad III de Miravalles, se implementó el primer contrato BOT (Build-Operate-Transfer) geotérmico en América Latina. En Nicaragua se aplicó un Contrato de Asociación en Participación entre la empresa estatal ENEL y un operador privado para la operación de la planta geotérmica ya existente de Momotombo, mientras que el campo de San Jacinto - Tizate ha sido concesionado a un desarrollador privado después que una PPP controlada por el Gobierno llevó el proyecto hasta la fase de factibilidad. En El Salvador se formó un Joint Venture entre la estatal CEL y un desarrollador privado para operar el sector geotérmico mediante la empresa mixta LaGeo. La entidad privada financió la instalación de la Unidad III, luego la JV se disolvió. En Guatemala, un contrato de tipo BOO (Build-Own-Operate) fue implementado entre la estatal INDE y un desarrollador privado para la construcción de la planta de Amatitlán.

actores (Muñoz, 2015). Los principales actores del proceso geotérmico y sus interrelaciones se ilustran en el diagrama 3.

Diagrama 3
Principales actores del proceso geotérmico



Fuente: Bona, 2014 (modificado).

En la industria geotérmica, así como en otros sectores similares, han sido frecuentes las iniciativas que por falta de una articulación oportuna y eficaz entre todas las partes involucradas han experimentado dificultades en desarrollarse, han sufrido atrasos y, en ocasiones hasta se han suspendido, debido a oposiciones sociales, restricciones ambientales, problemas legales y administrativos, falta de financiamiento, y condiciones desfavorables de mercado. Aceptación social, voluntad política y un marco regulatorio adecuado e incentivador son elementos fundamentales para desencadenar el proceso y movilizar los recursos financieros que son a su vez indispensables para sostener la investigación y desarrollo del recurso, facilitar el fortalecimiento institucional y promover la articulación (Muñoz, 2015).

Los primeros dos factores son de carácter general y responden a situaciones globales y aspectos técnicos, mientras que el tercero es de carácter más específico, enraizado en el contexto local, del país y del sitio en el cual se plantea desarrollar el proyecto, pero que se ramifica de forma muy compleja y dinámica abarcando todos los niveles de influencia, desde lo local del sitio, al regional, nacional, internacional y corporativo.

A pesar de las limitaciones anteriormente expuestas, en las regiones favorables la geotermia ha logrado desarrollos significativos. En ciertos países, incluyendo a algunos de América Latina (México, El Salvador, Costa Rica, Nicaragua), hasta ha llegado a ser un componente importante de la matriz energética⁹. Los éxitos han sido también debidos a la presencia de catalizadores que han estimulado y dirigido el proceso Oferta-Demanda de la geotermia a partir de combinaciones favorables de situaciones geológicas, geográficas, políticas, eventos naturales o históricos, aspectos

⁹ Por ejemplo, Islandia está generando el 29% de sus necesidades energéticas con plantas geotermo-eléctricas, El Salvador el 24%, Nueva Zelanda el 16%, Costa Rica el 15%, Filipinas el 14%, Nicaragua el 10%, o el caso muy particular de las Islas Azores (Portugal), donde el 42% de la generación eléctrica en la Isla de San Miguel y el 22% de todo el archipiélago está siendo suministrado por plantas geotérmicas (Bertani, 2015). Cabe observar que las limitadas dimensiones del mercado eléctrico en ciertos países favorecen la elevada tasa de participación de la geotermia. Por ejemplo, quedando en América Latina, en El Salvador y Costa Rica poco más de 200 MW geotérmicos instalados contribuyen con el 24% y el 15% de la generación eléctrica, mientras que en México 1.017 MW instalados corresponden solamente a una generación del 2,4% del total nacional.

socio-culturales, eventos de mercado y varios otros, lo cual introduce un ulterior factor de influencia para el desarrollo del recurso geotérmico. La situación geográfica de territorios insulares o pequeños países con recursos geotérmicos de buena calidad y fuerte dependencia de fuentes externas de energía, ha sido por ejemplo un factor catalizador para el desarrollo geotérmico en países como Islandia, Nueva Zelandia, o los países centroamericanos.

El caso de que toda la región Sudamericana no haya alcanzado un desarrollo tangible de su potencial geotérmico es por lo tanto singular y responde a una combinación de factores desfavorables asociados con la falta de elementos catalizadores. Obviamente el problema es complejo, con componentes de nivel regional, nacional y también local de cada proyecto, pero en términos generales se identifican los siguientes elementos comunes que han jugado un papel relevante:

- i) Condiciones geográficas desfavorables, con muchos de los recursos geotérmicos ubicados en la alta cordillera de los Andes, en zonas a menudo remotas, con condiciones climáticas difíciles, alejadas de los centros de consumo y de las redes eléctricas principales. Estos elementos complican la logística y aumentan los costos de ejecución de los proyectos.
- ii) Mercados eléctricos de medianas a grandes dimensiones, altamente competitivos e históricamente dominados por soluciones energéticas de bajo costo y abundantes, como la hidroelectricidad, el gas natural y otros combustibles fósiles (antes del 2005).

La combinación de estos dos elementos ha fundado históricamente las bases para un contexto de limitado interés hacia la geotermia, la cual ha sido normalmente enfocada por las instituciones de los mercados eléctricos sudamericanos como una opción sin perspectivas de poder contribuir sustancialmente al desarrollo de la oferta energética. Esto se convirtió en débil voluntad política e institucional y consiguiente falta de actores genuinamente comprometidos con la articulación del desarrollo geotérmico. En una visión de oferta-demanda, la situación se puede resumir en: un buen producto, con dificultades de extracción mayores a lo normal, de alguna forma considerado, pero no promovido eficazmente en mercados que por su lado no han sentido la exigencia y no han apreciado la globalidad de su valor.

Cuando, a finales de los años '90, inició a surgir con siempre mayor urgencia la necesidad de desarrollar las energías renovables para hacer frente a la problemática del cambio climático, las políticas energéticas en los países sudamericanos andinos dieron muestras de apertura a las energías renovables no convencionales, incluyendo a la geotérmica. Chile, que sufrió los impactos de la repentina suspensión del suministro de gas natural desde Argentina y de sequías que afectaron a la generación hidroeléctrica, fue el primer país en reconsiderar seriamente la opción geotérmica, abriendo el mercado a la inversión privada mediante promulgación de la Ley Sobre Concesiones de Energía Geotérmica en el 2000. Perú inclusive se había adelantado con la promulgación de la Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos en 1997, pero su aplicación no fue luego regulada hasta en 2006.

En los modelos chileno y peruano, que han apuntado a un desarrollo del sector geotérmico fuertemente centrado en la iniciativa privada (más radical en Chile, y con cierta participación del estado en Perú¹⁰), las cosas han avanzado algo en los últimos 10 años, pero en un proceso de aprendizaje que permitió descubrir las dificultades efectivas, los retos y las complejidades del sector, sin lograr el establecimiento de una industria geotérmica consolidada en el país. La falta de preparación de los sectores institucionales relacionados ha dificultado la articulación de los procesos, así que a menudo los desarrolladores privados se han enfrentado con situaciones complejas de gestión del contexto legal y del entorno ambiental, social y de mercado. En Perú, por ejemplo, han sido las empresas geotérmicas que a cierto punto han tomado la iniciativa de promover la articulación entre los

¹⁰ En Chile el desarrollo del sector geotérmico está fuertemente centrado en la inversión privada. El Gobierno garantiza una selección competitiva de los concesionarios y ejerce un control básico sobre el cumplimiento de las actividades de los desarrolladores. La participación institucional en la investigación geotérmica es marginal. En Perú el mecanismo de participación privada y control del Estado es similar al chileno, pero paralelamente el Ministerio de Energía y Minas ha desarrollado un Plan Maestro para el Desarrollo de la Energía Geotérmica (MEM-JICA, 2012) y ha llevado a cabo investigaciones en área geotérmicas prioritarias mediante el servicio geológico nacional INGEMMET. Los aspectos legales de la posible participación estatal en el desarrollo geotérmico están sin embargo poco claros.

diferentes actores para resolver problemáticas administrativas, sociales y ambientales que bloqueaban el desarrollo geotérmico (Muñoz, 2014). Por el lado de la industria, aunque tanto Chile como Perú han logrado captar el interés de desarrolladores geotérmicos reconocidos, la total apertura del sector ha llamado también la atención de empresas poco calificadas, en busca de oportunidades, las cuales han introducido cierta especulación en el sector. La competición generada por estas entidades ha llevado a la proliferación de cantidades de concesiones y aplicaciones sobre áreas con poca perspectiva de desarrollo, lo cual ha generado una imagen distorsionada del sector y fuertes cargas administrativas para las ya débiles instituciones encargadas de administrar la actividad geotérmica.

Otros países en la región escogieron mecanismos para el desarrollo de la geotermia controlados por el sector público (Ecuador y Bolivia), o están todavía en proceso de crear condiciones adecuadas para atraer a desarrolladores privados (Colombia, Argentina). En ninguno de estos países existe una legislación específica para la geotermia y la regulación del sector depende de distintos instrumentos legales, como códigos mineros o de aguas, leyes del sector eléctrico y/o leyes ambientales. También en estos casos hubo algún progreso, particularmente en los últimos 5 años, con la reanudación de estudios en viejos proyectos y, en el caso específico de Laguna Colorada en Bolivia, con el cierre de acuerdos financieros para la instalación de una planta geotermo-eléctrica. El contexto general del sector geotérmico en estos países se encuentra sin embargo todavía en fase temprana de preparación. Aunque diferentes entidades, estatales o mixtas, público-privadas, estén involucradas en diferentes proyectos, queda todavía bastante trabajo para consolidar las premisas de un desarrollo geotérmico viable y exitoso en estos países.

En conclusión, el conjunto de factores y situaciones anteriormente expuesto ha determinado la situación actual de 0 MWe geotérmicos en América del Sur. Como se puede apreciar, esfuerzos significativos son todavía necesarios para la consolidación de entornos adecuados al desarrollo geotérmico en el contexto específico de cada país, pero las condiciones han estado progresivamente madurando y en el futuro cercano empezarán a concretarse los primeros resultados, los cuales son de fundamental importancia por el efecto demostrativo y transformador que podrán difundir en el sector energético suramericano. A la fecha, existen dos proyectos geotérmicos que tienen perspectivas concretas para volverse realidad en el corto plazo: Cerro Pabellón, en Chile, donde el inicio de operaciones de construcción de una planta de 48 MWe ha sido anunciado en Julio del 2015 por la empresa Geotérmica del Norte¹¹; y Laguna Colorada, para el cual el Gobierno de Estado Plurinacional de Bolivia ha firmado en Julio de 2014 un acuerdo de financiamiento con la Agencia de Cooperación Internacional Japonesa (JICA) para la construcción de una primera unidad de generación de 50 MW¹². Estos proyectos están con planes de iniciar operación comercial respectivamente en 2017 y en 2020.

Por encima de todas las dificultades, en tiempos recientes ha surgido un nuevo factor para el ya complejo escenario de la geotermia en América del Sur, representado por la significativa reducción de precios en el mercado internacional de los hidrocarburos. A partir de mediados del 2014, el precio del petróleo pasó desde un valor que se había estabilizado por encima de los 100 US\$/barril a valores que se mantuvieron durante todo el 2015 alrededor de los 50 US\$/barril o inferiores. Los impactos de este fenómeno no se pueden todavía apreciar en su totalidad¹³, pero definitivamente implican ulteriores retos para la viabilidad económica de las iniciativas geotérmicas y una mayor necesidad de políticas de fomento para sostener el ya difícil desarrollo del sector.

¹¹ Nota de prensa de Enel Green Power, disponible en: https://www.enel.com/en-GB/media/press_releases/enel-green-power-and-enap-begin-work-in-chile-on-the-first-geothermal-plant-in-south-america/r/1664099.

Geotérmica del Norte, S.A.-Empresa mixta constituida por Enel Green Power, subsidiaria de la empresa energética italiana Enel (con una participación del 51%) y la estatal chilena Empresa Nacional de Petróleo (ENAP, con una participación del 49%).

¹² Nota de prensa de Japan International Cooperation Agency (JICA), disponible en: http://www.jica.go.jp/english/news/press/2014/140703_01.html.

¹³ En Chile, por ejemplo, la reducción de precios en el mercado de la energía, en parte asociada con el bajo costo del petróleo y en parte con la abundante oferta de otras energías renovables (solar y eólica en particular) parece haber afectado significativamente al ya débil sector geotérmico y determinado el retiro de por lo menos dos entre los más importantes desarrolladores con proyectos en planes avanzados de desarrollo. Ver por ejemplo: <http://www.revistaei.cl/2016/03/21/bajo-precio-de-la-energia-sigue-cobrando-victimas-cierran-empresas-de-geotermia/#>.

I. La geotermia en América del Sur: enfoque y perspectivas

América del Sur cuenta con amplias perspectivas de utilización del recurso geotérmico. Recientes estudios, basados en observaciones geotérmicas directas y en los parámetros geofísicos de las principales capas de la corteza continental¹⁴, han reconstruido la distribución del recurso a nivel regional y proveen una estimación de su capacidad (Cardozo et al., 2010; Pinto Vieira y Hamza, 2014). El mapa 3 resume los resultados de dichos estudios mediante un mapa de flujo de calor, un mapa del recurso base¹⁵ y un mapa del recurso recuperable¹⁶.

La mayoría del recurso se distribuye a lo largo del borde occidental de América del Sur, asociado con la intensa actividad tectónica y magmática de la Cordillera Andina, que genera condiciones muy propicias para la formación de sistemas geotérmicos de alta temperatura. En la porción centro-oriental del continente existen condiciones para recursos geotérmicos de menor temperatura, asociados con cuencas sedimentarias profundas y zonas fracturadas en el basamento precámbrico. Estos ocurren en ciertas regiones de Brasil, de Uruguay y del norte de Argentina, en las cuencas sedimentarias Amazónica, de Parnaíba, del Chaco-Paraná, y zona meridional del estado de Río Grande do Sul.

En términos de explotación del recurso geotérmico para generación de electricidad, la región andina es definitivamente la más favorecida por su potencial de recursos de alta temperatura, mientras que en la región centro-oriental del continente algunos sistemas de mediana y baja temperatura pueden presentar condiciones aptas para plantas geotermo-eléctricas de pequeña-mediana escala, con tecnología binaria, las cuales representan un sector que ha progresado considerablemente en tiempos recientes y que está mostrando interesantes perspectivas de desarrollo¹⁷.

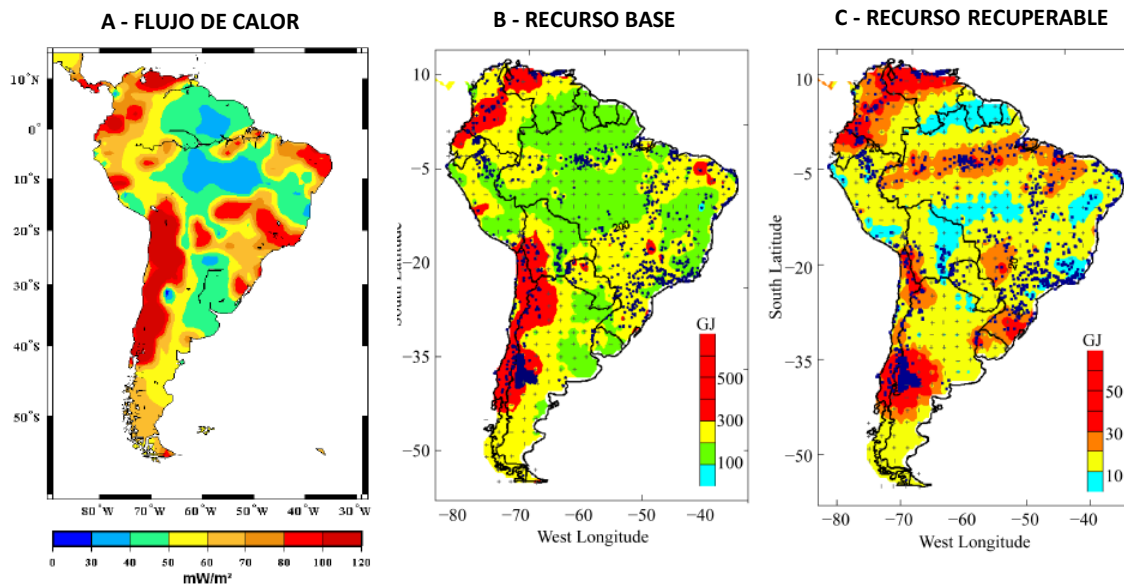
¹⁴ Estudios basados en datos de manifestaciones termales en superficie, mediciones de parámetros físicos en pozos (temperaturas, gradientes térmicos, flujo de calor y propiedades físicas de rocas) y datos geofísicos que caracterizan espesor, densidad, velocidad de ondas sísmicas y producción de calor radiogénico en la corteza continental.

¹⁵ Recurso Base (RB) definido como energía térmica en exceso contenida en un volumen de subsuelo de profundidad y superficie pre-establecidos. La temperatura de referencia para el cálculo del RB es la temperatura media anual en superficie. En los estudios indicados la profundidad de referencia considerada es de 3 km. Para mayores detalles ver Pinto Vieira y Hamza (2014).

¹⁶ Recurso Recuperable (RR) definido como la fracción de recurso base asociada con fluidos intersticiales la cual puede ser extraída con la tecnología actualmente disponible. Mayores detalles ver Pinto Vieira y Hamza (2014).

¹⁷ Por ejemplo, una planta binaria de 4 MWe alimentada por agua geotérmica a 105°C ha sido puesta en operación en Turquía en 2015. Ver mayores detalles en: <http://piensageotermia.com/archives/25190>.

Mapa 3
Distribución del recurso geotérmico en América del Sur



Fuente: A: mapa de flujo de calor (tomado de Cardozo, 2010). B y C: mapa de recurso base y recurso recuperable por área unitaria, hasta la profundidad de 3 km (tomados de Pinto Vieira y Hamza, 2014). Los puntos azules indican datos medidos, mientras que el retículo de puntos uniformemente distribuidos corresponde a datos estimados.

Nota: Los límites y los nombres que figuran en este mapa no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

El objetivo del presente estudio está enfocado en la región andina, donde la explotación del recurso geotérmico puede tener un desarrollo significativo en el corto-mediano plazo. En esta región, las perspectivas para el desarrollo geotermo-eléctrico no son sin embargo uniformemente distribuidas, dado que por razones geodinámicas y tectónicas la actividad magmática reciente y las zonas con elevado flujo de calor se concentran en sectores bien definidos (mapa 4).

Juntando las evidencias ilustradas en los mapas 3 y 4 se aprecia que los sectores más favorecidos para el desarrollo del recurso geotérmico son las porciones central y septentrional de Chile, la franja centro-occidental de Argentina, la extremidad meridional de Perú, el suroeste de Bolivia, la porción centro-septentrional de Ecuador y el suroeste de Colombia, y la franja costera de la República Bolivariana de Venezuela.

Todos estos países (Chile, Argentina, Perú, Bolivia, Ecuador, Colombia, Venezuela) han sido objeto de investigaciones geotérmicas, generalmente a partir de los años '70, y cuentan con diferentes niveles de identificación del recurso. El cuadro 1 resume los principales aspectos geotérmicos de los países andinos, indicando el año en el cual iniciaron las investigaciones geotérmicas para fines eléctricos, la cantidad de manifestaciones termales inventariadas, el número de áreas o prospectos geotérmicos conocidos, la cantidad de proyectos geotérmicos que con base en la información públicamente disponible y el criterio técnico de los autores tiene perspectivas concretas de contener un recurso apto para un desarrollo geotermo-eléctrico, y el potencial geotérmico a nivel nacional según las estimaciones más razonables disponibles en literatura. A continuación se reporta una síntesis de la situación en cada país.

Mapa 4
Distribución de volcanes cuaternarios en América del Sur



Fuente: Lahsen et al., 2015.

Nota: Los límites y los nombres que figuran en este mapa no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

Cuadro 1
Principales características geotérmicas de los países andinos

País	Inicio investigaciones geotérmicas	Cantidad manifestaciones termales	Áreas geotérmicas identificadas	Proyectos geotermo-eléctricos	Potencial estimado (MWe) ^a
Argentina	(años '50) -1971	450	~ 40	5	490 – 2 010
Bolivia (Estado Plurinacional de)	1975	~ 70	~ 20	3	510 – 2 490
Chile	(1921) 1968	> 300	20-25	11	1 000 - 2 950
Colombia	1968	~ 300	15	4	700 – 2 210
Ecuador	1979	167	24	3	500-1 700
Perú	1975	> 500	61	11	2 860
Venezuela (República Bolivariana de)	1974	~ 70	>30	1	370 - 910

Fuente: Elaboración propia.

^a Rango de valores disponibles en literatura, con exclusión de las estimaciones que, según el criterio de autores del presente documento, proporcionan visiones altamente especulativas del potencial geotermo-eléctrico efectivamente explotable.

A. Argentina

1. Reseña histórica de la investigación geotérmica

Argentina es el país en América del Sur que más avance ha tenido en el sector geotérmico, llegando a producir electricidad mediante una planta geotermo-eléctrica piloto y desarrollando diferentes aplicaciones de uso directo del calor.

La presente sección resume las principales fases y acontecimientos históricos de la geotermia en Argentina, con particular atención a las actividades enfocadas en el desarrollo geotermo-eléctrico. La información reportada deriva principalmente de Sierra y Pedro (1998) y de los sitios web del Servicio Geológico Mínero Argentino (SEGEMAR)¹⁸ y de la Agencia de Promoción de Inversiones y Desarrollo de Neuquén (ADE-NQN)¹⁹.

Argentina inició a interesarse en la posibilidad de utilizar sus recursos geotérmicos para generar electricidad en los años '50, cuando el Gobierno Federal encargó la evaluación de algunas zonas termales del país a la firma italiana Larderello SpA²⁰. Copahue, en la Provincia del Neuquén, fue clasificado en ese entonces como el sitio más prometedor para el desarrollo de un recurso de alta entalpía. Sin embargo, actividades significativas no iniciaron hasta veinte años después, a principios de los años '70.

En 1971, el Gobierno Argentino recibió el apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) para evaluar las perspectivas geotérmicas del país. Una misión llevada a cabo por expertos del PNUD reconfirmó en esa ocasión Copahue como el sitio más promisorio para comenzar con la exploración geotérmica. Esto condujo a la creación, en 1974, de una entidad específica para la ejecución de investigaciones geotérmicas, denominada "Comisión Nacional de Estudios Geotérmicos", integrada por el Ministerio de Energía, la empresa petrolera estatal YPF y el Gobierno Provincial de Neuquén. Dicha entidad llevó a cabo investigaciones geológicas y geoquímicas en las áreas de Copahue y Domuyo (en la Provincia del Neuquén), y en 1976 perforó el primer pozo en Copahue (COP-I), el cual confirmó la existencia de un sistema geotérmico de alta temperatura. Luego, las actividades se estancaron por falta de fondos.

En 1979, el Gobierno Federal tomó nuevamente la iniciativa a través de la Secretaría Nacional de Energía y Planificación, que preparó un plan específico para el desarrollo de la energía geotérmica, denominado "Regionalización Geotérmica 1979", el cual recibió el apoyo de programas de cooperación internacional. Los objetivos del plan fueron inicialmente planteados para ejecutar once estudios de reconocimiento y doce estudios de pre-factibilidad en doce provincias del país, en el plazo 1980-1984. El logro de dichos objetivos fue sin embargo parcial, dado que se alcanzó el nivel de pre-factibilidad solamente en las áreas geotérmicas de Copahue, Domuyo y Tuzgle-Tocomar, mientras que los estudios de reconocimiento abarcaron solamente cinco provincias (Salta, Jujuy, Catamarca, La Rioja y San Juan). La cooperación italiana lideró el estudio de pre-factibilidad de Copahue, y llevó a cabo el reconocimiento en el noroeste de Argentina, seguido por el estudio de pre-factibilidad de la zona Tuzgle-Tocomar; mientras que la cooperación japonesa contribuyó con el estudio de pre-factibilidad en la zona de Domuyo. Los resultados fueron particularmente interesantes para Copahue, donde un nuevo pozo (Copahue-I, perforado en 1981) descubrió un reservorio geotérmico con producción de vapor. En Tuzgle-Tocomar y en Domuyo fueron identificadas condiciones promisorias para la existencia de recursos geotérmicos de interés comercial.

En 1985, la creación del Centro Regional de Energía Geotérmica del Neuquén (CREGEN), con el apoyo de la Secretaría Nacional de Energía, en colaboración con el Gobierno Provincial del Neuquén y con la Universidad Nacional de Comahue, dinamizó ulteriormente el sector. El CREGEN concentró sus esfuerzos en el campo geotérmico de Copahue, donde perforó un pozo adicional e

¹⁸ www.segemar.gob.ar/geotermia.

¹⁹ <http://adinqn.gov.ar/geotermia>.

²⁰ Larderello SpA, empresa que desarrolló el campo geotérmico de Larderello en Toscana (Italia), sucesivamente integrada en la empresa eléctrica nacional Ente Nacional de Energía Eléctrica (Enel), en 1963.

instaló una pequeña planta piloto de 0,67 MWe (en 1988), mientras que se completaba un estudio de factibilidad con el apoyo de la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA). El CREGEN también llevó a cabo actividades en Domuyo, donde instaló en 1987 un sistema de calefacción geotérmica para las instalaciones turísticas. La tarea del CREGEN no fue sin embargo limitada al Neuquén, sino proporcionó asistencia técnica a otras provincias, realizando estudios hidrogeológicos y geoquímicos complementarios en Tuzgle-Tocomar (Jujuy y Salta, 1988), estudios de reconocimiento en el área de Famatina (La Rioja y Catamarca, 1987) y en el área de Río Hondo-Taco Ralo (Tucumán y Santiago del Estero, 1987-1988). Desafortunadamente, el CREGEN operó solamente hasta 1990, cuando la Secretaría Nacional de Energía suspendió la provisión de fondos a los centros regionales.

A principios de los años '90, el débil apoyo institucional y los bajos costos de la energía generada por recursos hidroeléctricos y combustibles fósiles, paralizaron las actividades geotérmicas en Argentina. A partir de ese momento no hubo significativo progreso en el sector de la energía geotérmica para la generación de electricidad. Solamente el SEGEMAR ha mantenido cierta actividad con la compilación de un catálogo de manifestaciones termales (Miranda y Pesce, 2000; Pesce y Miranda, 2003) y apoyando la investigación de prospectos de baja entalpía para aplicaciones directas, donde ha sido logrado un progreso significativo (Pesce et al., 2014; Pesce, 2015).

En los últimos años la situación mostró algunas señales de cambio, con el surgimiento de iniciativas dirigidas a reactivar el sector geotermo-eléctrico. Algunos gobiernos provinciales (Neuquén, San Juan, Mendoza, Jujuy, Salta) están intentando promover la participación de empresas privadas en el desarrollo de proyectos geotérmicos mediante la aplicación de mecanismos concesionales o la creación de empresas mixtas público-privadas. Mayores detalles acerca de estas actividades se reportan en la sucesiva sección.

2. Marco legal

Argentina no tiene instrumentos legislativos específicos para la exploración y explotación del recurso geotérmico, pero la actividad geotérmica está contemplada en el Código de Minería²¹, y regulada también por los Códigos de Agua provinciales.

En el Código de Minería, el recurso geotérmico es definido como "vapor endógeno", y considerado parte de una categoría de minas. Las concesiones de recursos geotérmicos están sujetas a las mismas reglas establecidas para las operaciones mineras, acomunando la explotación de fluidos calientes subterráneos con la extracción de minerales.

El Código de Aguas es un instrumento jurídico emitido a nivel provincial y varía de una provincia a otra. Este código se basa en el concepto legal de que el agua es de dominio público, propiedad de la Provincia, así que el derecho de uso del agua requiere una concesión expedida por el Departamento Provincial de Aguas. La obtención de concesiones de agua implica una serie de procedimientos administrativos concebidos para actividades y condiciones típicamente asociadas con la exploración y explotación de recursos hídricos.

Este marco normativo, cuando se aplica a la energía geotérmica resulta débil y algo complejo, por lo cual ya surgieron algunas iniciativas que tratan de mejorar la situación; entre ellas una propuesta de modificación y aclaración del término "vapor endógeno" en el Código de Minería, (Cámara de Diputados de la Nación, 2006), y un proyecto de Ley Geotérmica (BNamericas, 2010), pero sin llegar a resultados concretos hasta la fecha.

En el contexto más amplio de las energías renovables es interesante observar que, a pesar de existir un marco regulatorio de fomento desde 1998, la geotermia no fue considerada elegible como energía renovable en Argentina hasta en el 2007.

²¹ Código de Minería de la República Argentina - Decreto 456/97. Publicado en el Boletín Oficial No. 28.658, el 30 de Mayo, 1997.

El marco legal de las energías renovables, incluyendo a la geotermia, está definido por la Ley 26.190 de diciembre 2006²², sucesivamente modificada en septiembre del 2015²³, la cual establece la política nacional de promoción del uso de fuentes renovables. Dicha ley declara de interés nacional la generación de electricidad con fuentes renovables para la prestación de servicio público, así como la investigación para el desarrollo tecnológico y fabricación de equipos para este fin. La ley establece el objetivo de aumentar la contribución de las energías renovables hasta el 8% del consumo nacional de electricidad para el año 2017 y alcanzar un 20 por ciento para el año 2025. Los incentivos establecidos en la ley incluyen la conformación de un fondo fiduciario (FODER) para respaldar la financiación de los proyectos de inversión, varios beneficios fiscales, un sistema de subasta para la contratación de energía renovable (GENREN) y una remuneración adicional mediante tarifa regulada (*feed-in tariff* - FIT) con respecto al precio de mercado de la energía. Otro factor de fomento introducido por la ley obliga a los grandes usuarios de energía eléctrica, particularmente aquellos con consumo igual o superior a 300 kW, a cumplir individualmente las metas de consumo de energías renovables fijados por la Ley, mediante contratación directa en el mercado, o ejecución de proyectos propios.

3. Principales proyectos geotérmicos

Argentina cuenta con un mapa de subdivisión del territorio en función de sus perspectivas geotérmicas (mapa 5) y con un inventario de fuentes termales²⁴, pero no dispone de una evaluación integral del recurso geotérmico potencial a nivel nacional con identificación de proyectos y correspondientes perspectivas de desarrollo.

Según reportado por Pesce (2015), Argentina cuenta actualmente con siete proyectos geotérmicos, clasificados de “alta entalpía”²⁵, en su mayoría ubicados en la cordillera andina. En adición a los proyectos históricos de Copahue, Domuyo y Tuzgle-Tocomar, aparecen en la lista las nuevas iniciativas de Los Despoblados, Termas de Río Hondo, Los Molles y Peteroa. No todos estos proyectos cuentan sin embargo con evidencias e información suficiente para catalogarlos con perspectivas concretas de contener un recurso apto para un desarrollo geotermo-eléctrico. Los proyectos con estas características son indicados en el mapa 5 y sus características se resumen en el cuadro siguiente.

Cuadro 2
Áreas geotérmicas con perspectivas de desarrollo eléctrico de Argentina

Provincia geológica	Región administrativa	Área geotérmica	Nivel de estudio	Temperatura estimada / medida (°C)	Potencial reportado (MWe)
	Neuquén	Copahue	Factibilidad	250	30 ^a
Cordillera Andina	Neuquén	Domuyo	Exploración superficie	180-225	n.d.
	San Juan	Los Despoblados	Exploración superficie	140-180	20
	Salta	Tocomar	Exploración superficie	130-140	n.d.
	Jujuy	Tuzgle	Exploración superficie	130-140	n.d.

Fuente: Elaboración propia.

^a Potencial reportado en literatura y referido al recurso confirmado con perforaciones existentes. Es muy probable que el potencial total del campo sea mayor.

²² Ley 26.190 Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica. Boletín Oficial, 2 de Enero de 2007. Regulada por el Decreto 562/2009. Reglamentación de la Ley 26.190 (Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica. Boletín Oficial, 20 de Mayo de 2009.

²³ <http://www.energiaestrategica.com/dia-historico-congreso-aprobo-nueva-ley-de-energias-renovables-por-amplia-mayoria>.

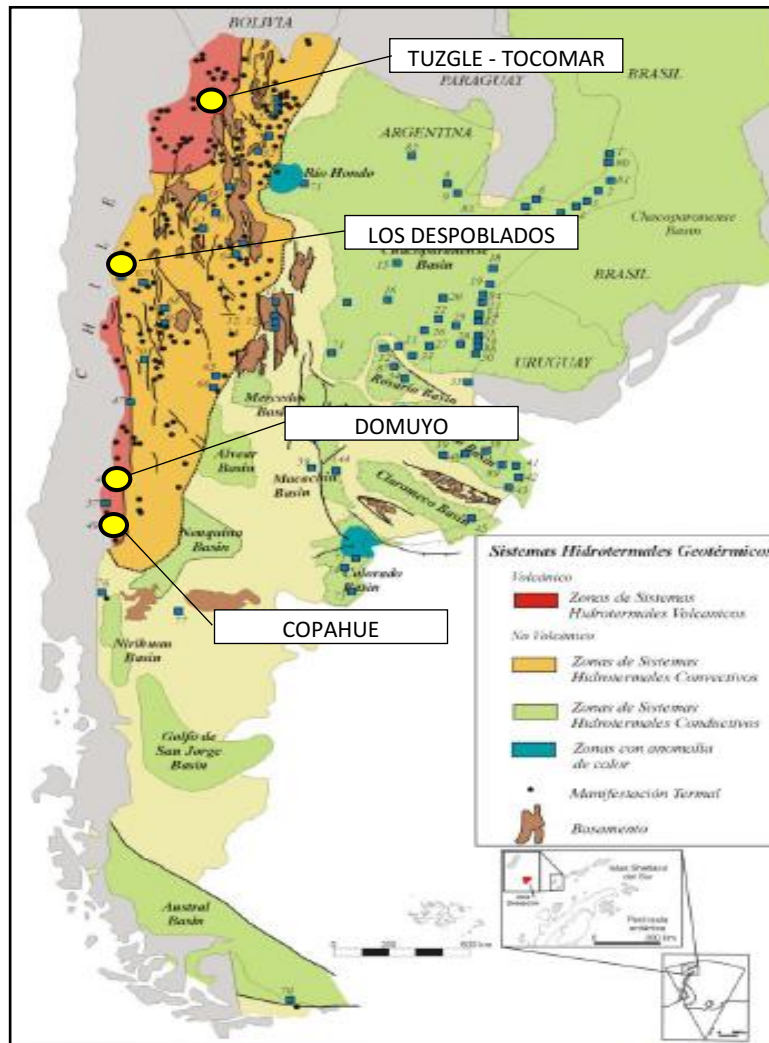
²⁴ Catálogo de Manifestaciones Termales de Argentina, publicado por SEGEMAR en 2003, subdividido en dos volúmenes: Vol I - Región Noroeste y Vol II - Región Noreste, Centro y Sur. Reporta las características de más de 450 fuentes termales.

²⁵ La expresión “alta entalpía” utilizada por Pesce (2015) debe de entenderse referida a proyectos con perspectivas de uso eléctrico. La información disponible permite caracterizar solamente Copahue y Domuyo como recursos probados, o probables, de alta temperatura, mientras que en todos los demás proyectos los indicios son de temperaturas moderadas, muy probablemente inferiores a los 200°C, o son insuficientes como para estimar las condiciones térmicas del reservorio geotérmico.

Copahue

El campo geotérmico de Copahue se encuentra en el borde occidental de la Provincia del Neuquén, al confín con Chile, alojado en una amplia depresión volcano-tectónica (Caldera de Caviahue) que se desarrolla en la base de la ladera noreste del volcán activo de Copahue (mapa 5). El área se caracteriza por relieves suaves, a elevaciones de 2.000-2.100 m s.n.m, y es fácilmente accesible por estar cercana al importante centro turístico de Caviahue.

Mapa 5
Zonificación geotérmica de Argentina y ubicación de los principales proyectos con perspectivas de desarrollo geotermo-eléctrico



Fuente: Pesce et al., 2014 (modificado).

Nota: Los límites y los nombres que figuran en este mapa no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

Copahue es el proyecto geotérmico más avanzado de Argentina y entre los más avanzados en América del Sur, contando con 4 pozos exploratorios de diámetro comercial (profundidad variable entre 954 y 1.414 m) que demostraron la presencia de un recurso de vapor dominante con temperatura en el rango de 230-250°C. La exploración y la perforación de los pozos fue llevada a cabo en los años '70-'80. La evaluación de datos disponibles financiada a finales de los '80 por la Agencia de Cooperación Japonesa (JICA) determinó la factibilidad de un desarrollo de 30 MWe por un periodo de 30 años (Pesce, 2010; Pesce et al., 2014; Pesce, 2015).

A pesar de los resultados prometedores, y de las condiciones logísticas favorables del área, el proyecto no ha tenido un desarrollo significativo. Una planta piloto binaria (670 kWe) instalada en 1988 por el CREGEN funcionó hasta 1997 para luego ser abandonada, mientras que en 1998 fue instalado un sistema de deshielo de las calles de Caviahue alimentado por vapor geotérmico.

A partir de 2009, el Gobierno del Neuquén ha estado promoviendo la reactivación del proyecto geotermo-eléctrico en Copahue, obteniendo la concesión (minera) para la explotación geotérmica y dictando un decreto para permitir actividades geotérmicas dentro del área protegida Copahue-Caviahue²⁶, con el objetivo de desarrollar el campo con un operador privado, seleccionado mediante licitación pública internacional. En agosto 2010 el Gobierno del Neuquén adjudicó un contrato para el desarrollo de 30 MWe en Copahue a la empresa canadiense Geothermal One²⁷, a la cual sucedió la empresa australiana Earth Heat Resources, que tomó el control del proyecto. Durante 2011 y 2012 Earth Heat Resources preparó un estudio técnico y un informe de evaluación ambiental para la planta geotérmica y se dedicó a gestiones para asegurar la venta de energía y el financiamiento para el proyecto, reportando en los medios importantes logros en estas actividades²⁸. Sin embargo, en Agosto de 2013 la empresa se retiró aduciendo varias razones de carácter financiero y de seguridad de inversión en el país (Pesce, 2015). El Gobierno de Neuquén no ha dado a conocer públicamente nuevos planes para el proyecto.

Cabe observar que desde su reactivación en 2009, el proyecto recibió cierta oposición, cuando organizaciones sociales apelaron contra el decreto provincial que autorizó la ejecución del desarrollo geotérmico en el área protegida de Copahue, luego seguidas por otras protestas en 2012²⁹.

Domuyo

El área geotérmica de Domuyo se ubica en la esquina septentrional de la Provincia del Neuquén, en una región remota de la cordillera andina, a elevaciones de 2.000-2.500 m s.n.m., unos 330 km al noroeste de la capital provincial (mapa 5). El centro poblado más cercano es el pequeño pueblo de Varvarco, situado unos 20 km al sur de la zona geotérmica, mientras que la ciudad más cercana es Andacollo localizada unos 65 km al sur.

El prospecto se caracteriza por varias manifestaciones superficiales de alta temperatura (fumarolas, aguas termales y géiseres) dispersas en un amplio sector en la ladera occidental del Cerro Domuyo, el cual es un complejo volcánico inactivo, principalmente formado hace 2,85-3,22 Ma, pero con evidencias de reactivación en tiempos más recientes (domos riolíticos datados 0.11 Ma; Pesca, 2013).

La exploración geotérmica en la zona fue efectuada principalmente en la primera mitad de los años '80, a través de un acuerdo de cooperación con el Gobierno del Japón. Los estudios fueron realizados en fases subsiguientes, a partir de un reconocimiento inicial sobre un área de 15.000 km² y concluyendo con la selección de un área más prometedora de 40 km² en la vertiente occidental del complejo volcánico de Domuyo, donde se encuentra la mayoría de las manifestaciones termales. Las investigaciones incluyeron la interpretación regional de imágenes de satélite y fotografías aéreas, estudios geológicos,

²⁶ Parque Provincial Copahue-Caviahue, creado en 1962 con objetivo de proteger los bosques de araucaria en su ambiente natural, y los recursos termales presentes en el área. Mayores detalles en: http://www.sib.gov.ar/area/NEUQUEN*CC*Copahue-Caviahue.

²⁷ Ver detalles sobre el proceso de preparación y licitación del proyecto en el sitio web de Agencia Para La Promoción y Desarrollo de Inversiones del Neuquén, Sociedad del Estado Provincial; (ADI-NQN SEP): http://adinqn.gov.ar/geotermia_copahue.htm.

²⁸ Ver por ejemplo las noticias publicadas en Proactive Investors, 2011 y 2012: Earth Heat Resources clinches agreement for 30 MW power purchase offtake in Argentina. Newsletter: October 18, 2011. <http://www.proactiveinvestors.com.au/companies/news/20864/earth-heat-resources-clinches-agreement-for-30mw-power-purchase-offtake-in-argentina--20864.html>.
Earth Heat Resources progresses funding agreements for Copahue geothermal project. Newsletter: February 13, 2012. <http://www.proactiveinvestors.com/companies/news/24918/earth-heat-resources-progresses-funding-agreements-for-copahue-geothermal-project-24918.html>.

²⁹ Ver por ejemplo: <http://www.noalamina.com/mineria-informacion-general/general/la-justicia-suspendio-proyecto-geotermico-de-copahue-3>; <http://avacaviahue.blogspot.com/>.

geoquímicos y geofísicos, el mapeo de temperatura del suelo y la perforación de pozos de gradiente de temperatura, alcanzando un nivel de pre-factibilidad en la evaluación del recurso³⁰. Sucesivamente no hubieron actividades adicionales en la zona, con la exclusión de la instalación de un sistema de calefacción geotérmica para instalaciones turísticas, construido por el CREGEN en 1987.

Pesce (2013) ha publicado recientemente una revisión de toda la información disponible, proporcionando un resumen de la situación actual del proyecto Domuyo. Los rasgos geotérmicos del área se caracterizan por un entorno vulcanológico y estructural prometedor, en presencia de extensas manifestaciones termales superficiales, asociadas con diversas anomalías geofísicas. La temperatura del recurso es estimada ser muy probablemente superior a 200°C (214-223°C) en un reservorio geotérmico ubicado a 800-1.000 m de profundidad.

En 2008, el Gobierno Provincial de Neuquén reconsideró la oportunidad geotérmica y encargó a la Agencia para la Promoción y Desarrollo de Inversiones del Neuquén (ADI-NQN SEP) la ejecución de estudios de factibilidad técnica y económica para el desarrollo geotérmico en el área de Domuyo. En septiembre de 2012, ADI-NQN emitió documentos de licitación, llamando a inversionistas interesados en presentar propuestas para explorar los recursos geotérmicos en la zona Domuyo, ofreciendo a la empresa adjudicataria del contrato de exploración el derecho a desarrollar sucesivamente el recurso, construir plantas de energía y vender la electricidad en el mercado mayorista de Argentina por un período de hasta 25 años. El plazo para presentar ofertas, fue inicialmente fijado el 23 de noviembre de 2012, pero ha sido postergado en varias ocasiones sin recibir ofertas.

En marzo de 2015 El Gobierno Federal, a través de la Secretaría de Energía, y en el marco de un “Programa de Estudios en el Sector Energético de la República Argentina” financiado mediante un préstamo del Banco de Desarrollo de América Latina (CAF), emitió una licitación pública internacional para profundizar los estudios en el área de Domuyo, con el objetivo de obtener un modelo conceptual del campo geotérmico y determinar el potencial del recurso para su utilización en la generación de energía eléctrica a escala comercial³¹. El proceso de licitación terminó con la adjudicación del contrato al consorcio entre la empresa geotérmica mexicana ENAL y la consultora de ingeniería argentina PROINSA. Los estudios están planificados para realizarse en 2015-2016³².

El área geotérmica se encuentra al interior del área protegida Reserva Provincial de Flora Domuyo, la cual fue instituida en 1989 con el objetivo de conservar sistemas ecológicos esenciales, la diversidad genética y los recursos naturales del área³³.

Los Despoblados

El sitio geotérmico de Los Despoblados se encuentra 265 km al NO de la capital provincial de San Juan, en una región muy remota de la alta cordillera andina, conocida como Valle del Cura (mapa 5). El área de interés geotérmico se encuentra a elevaciones de 3.900-4.000 m s.n.m. En todo el Valle del Cura no hay asentamientos humanos, pero existen los importantes centros mineros de Veladero y Pascua-Lama³⁴, cuyos campamentos albergan respectivamente a 3.000 y 4.000 personas, y se encuentran 4 y 15 km al noroeste de la zona geotérmica de Los Despoblados. La carretera de acceso a las minas cruza el área geotérmica, la cual cuenta así con buen acceso y facilidades logísticas.

En Los Despoblados se encuentran las manifestaciones termales más llamativas y de mayor temperatura (78°C) de todo el Valle del Cura, en el cual existen varios manantiales calientes asociados

³⁰ Para mayor información referirse al sitio web de ADI-NQN: http://adinqn.gov.ar/geotermia_domuyo.htm.

³¹ <http://www.adinqn.gov.ar/index.php/es/prensa3/310-licitan-nuevos-estudios-para-evaluar-el-potencial-geotermico-en-domuyo>.

³² <http://www.adinqn.gov.ar/index.php/es/prensa3/315-se-dio-lugar-a-la-apertura-de-ofertas-economicas-para-desarrollar-el-estudio-del-campo-geotermico-del-proyecto-domuyo>.

³³ Ver mayores detalles sobre la reserva Domuyo en: http://www.sib.gov.ar/area/NEUQUEN*DO*DOMUYO.

³⁴ Ambas minas operadas por Minera Argentina Gold, S.A. (MAGSA), subsidiaria de Barrick Gold Corp. Veladero está en operación, mientras que Pascua Lama se encuentra en fase avanzada de construcción.

con importantes estructuras tectónicas. En la zona no hay vulcanismo reciente³⁵, por lo cual el sistema geotérmico de Los Despoblados está muy probablemente asociado con circulación convectiva profunda en zonas de falla, presentando condiciones para un recurso de mediana temperatura (alrededor de los 150°C) y modestas perspectivas de desarrollo.

Dada la ubicación remota del sitio y las características del sistema geotérmico, el proyecto Los Despoblados no sería de mucho interés si no existiera una demanda local de energía, así que la presencia de operaciones mineras en Veladero y Pascua Lama representa una oportunidad muy afortunada. La energía eléctrica para las operaciones de la mina Veladero se genera actualmente en el sitio utilizando generadores diesel y una turbina eólica. El complejo minero tiene 17 MWe de capacidad termo-eléctrica instalada y consume 30 millones de litros de combustible al año, que se transportan en camiones por más de 400 km, desde Luján de Cuyo (Energy News, 2013). El generador eólico de Veladero, con capacidad de 2 MW³⁶ suministra energía de manera muy irregular debido a las condiciones climáticas muy variables del sitio (Barrick, 2010). La geotermia representa por lo tanto una opción muy atractiva para suministrar energía más barata y confiable para las operaciones mineras.

Los primeras evaluaciones del potencial geotérmico en la región del Valle del Cura fueron realizadas en los años '80, cuando el Gobierno Federal patrocinó la ejecución de investigaciones geoquímicas contratadas a las empresas ESIN Consultora, S.A (en 1982) e Hidroproyectos S.A. (en 1985) (Pesce y Miranda, 2003). Dichas investigaciones no fueron seguidas por estudios más avanzados. No hay información de otras investigaciones hasta en 2010, cuando Geotermia Andina, S.A. (GASA)³⁷ reanudó la exploración geotérmica en la zona.

GASA obtuvo el derecho de realizar exploración geotérmica en Los Despoblados a través de una "Unión Transitoria de Empresas" (UTE) con la empresa eléctrica provincial de San Juan (EPSE). La participación en la UTE fue inicialmente 10% EPSE, con la asignación de los derechos geotérmicos, y 90% GASA, con responsabilidad financiera y técnica de las actividades de exploración. Entre 2010 y 2012 GASA realizó investigaciones geológicas, geoquímicas y geofísicas obteniendo indicaciones favorables para la existencia de un recurso geotérmico con temperatura alrededor de los 150°C (G. Stangalino, Presidente de GASA, comunicación personal).

En octubre de 2012 GASA y su socio EPSE establecieron un acuerdo con Barrick Gold Corp., para financiar la fase de factibilidad del proyecto geotérmico³⁸. Barrick adquirió el 70% de participación en la UTE con compromiso de financiar la perforación exploratoria; GASA redujo su participación al 20% y EPSE mantuvo su participación inicial del 10%. En la negociación fue incluido también un acuerdo de contrato de compra de energía (PPA) por parte de Barrick (G. Stangalino, Presidente de GASA, comunicación personal).

En 2013 Barrick, con el apoyo técnico de GASA y bajo supervisión de la empresa consultora GeothermEx, perforó cinco pozos de gradiente de 250 m de profundidad en Los Despoblados, reportando temperaturas de hasta 57°C. El proyecto fue sucesivamente anunciado para proceder con perforaciones exploratorias profundas y un estudio de factibilidad para una planta geotérmica de 20 MWe (Energy News, 2013), sin embargo las actividades se estancaron y no hubo reporte de ulteriores avances en el proyecto hasta la fecha.

³⁵ El área se encuentra en la zona sin vulcanismo cuaternario de los Andes centrales. Los últimos depósitos volcánicos significativos se formaron en la región alrededor de hace 6 Ma, mientras que la actividad volcánica más joven conocida es un pequeño y aislado domo riolítico del Plioceno (Cerro de Vidrio, datado en 2,0 Ma - Bissig et al., 2002), ubicado unos 7 km al NO de Los Despoblados.

³⁶ Instalado a 4.110 m s.n.m., es reportado como el generador eólico instalado a mayor elevación en el mundo y suministra energía de manera muy irregular debido a condiciones de viento muy variables, con fuertes ráfagas.

³⁷ Geotermia Andina S.A., subsidiaria en Argentina de la empresa canadiense Andean Geothermal Power Inc.

³⁸ <http://www.mining.com/web/geotermia-andina-to-develop-the-los-despoblados-geothermal-project-in-argentina-for-barrick-gold/>.

Tuzgle y Tocomar

Tuzgle-Tocomar es un amplio sector de interés geotérmico ubicado en el noroeste de Argentina, en la zona fronteriza entre las provincias de Salta y Jujuy, 135 km al noroeste de la ciudad de Salta y 25 km al oeste del poblado de San Antonio de Los Cobres (mapa 5). A pesar de su ubicación algo remota, y elevación mayor de 4.000 m s.n.m., el área es fácilmente accesible y presenta condiciones morfológicas muy favorables para el eventual desarrollo de instalaciones geotérmicas. Además, el sector de Tocomar es atravesado por la línea de transmisión eléctrica internacional que conecta la planta termo-eléctrica de Cobos, en la Provincia de Salta, con Chile. Dicha línea tiene una capacidad de 345 kV y es operada por TermoAndes³⁹, que exporta esporádicamente energía a Chile, aunque ocupando parcialmente la capacidad de transmisión de la línea.

El sector abarca al Volcán Tuzgle y a la zona de falla de Tocomar, la cual es parte de la importante estructura tectónica regional, transversal a la cordillera andina, denominada Calama-Olacapato-El Toro. El Volcán Tuzgle es un amplio estrato-cono que se formó durante los últimos 0,5 Ma y muestra evidencias de actividad en el Holoceno, mientras que la zona de Tocomar se caracteriza por intenso fallamiento asociado con modestos volúmenes de productos volcánicos (conos de escorias y flujos lávicos de composición máfica, secuencias de tobas ignimbríticas y depósitos de explosión freática) cuya edad varía entre 1,5 y 0,5 Ma (Giordano et al., 2013). El interés geotérmico del área es determinado por la presencia de varias manifestaciones termales distribuidas alrededor de la base del Volcán Tuzgle y a lo largo del sistema de falla Calama-Olacapato-El Toro. La temperatura de las fuentes termales varía generalmente en el rango 30-50°C, pero alcanza los 56°C en la zona del Volcán Tuzgle y hay reportes históricos de hasta 80°C en el área termal principal de Tocomar.

La investigación de los recursos geotérmicos en esta zona comenzó a finales de los años '70, a través de un programa de cooperación del Gobierno de Italia. La firma italiana Aquater realizó los primeros estudios de reconocimiento en 1979, identificando al sector que comprende el Volcán Tuzgle y la zona Tocomar como un área muy prometedora para la exploración geotérmica. Durante los años '80 siguieron estudios de pre-factibilidad, con la participación de diferentes agencias y empresas de consultoría⁴⁰, las cuales generaron una gran cantidad de datos geológicos, vulcanológicos, geoquímicos y geofísicos. Los datos geoquímicos indican temperaturas mínimas del recurso alrededor de 130-140°C (Panarello et al., 1990; Pesce, 2014). La fase de pre-factibilidad culminó luego en 1989-1990 con un programa de pozos de gradiente térmico en una zona seleccionada al oeste y sur del Volcán Tuzgle, financiado por el Gobierno Provincial de Jujuy. Los resultados revelaron dos áreas con elevado gradiente: una situada al sur y otra al margen noroeste del edificio volcánico (Coira, 1995).

A principios de los años 90 las actividades de exploración geotérmica en Tuzgle-Tocomar se estancaron, y no se reportan avances significativos en el proyecto hasta el momento, con la excepción de algunos aportes de instituciones científicas nacionales e internacionales que han estudiado el contexto vulcanológico y geo-estructural asociado con los posibles sistemas geotérmicos en la zona. Estos estudios generaron diferentes modelos conceptuales con interpretaciones de la localización y extensión del sistema geotérmico (Coira, 1995; Drover, 1995; Giordano, 2013).

La empresa Geotermia Andina S.A.⁴¹ detiene concesiones mineras en sectores clave de Tuzgle y Tocomar y está en conversaciones con los gobiernos provinciales de Jujuy y Salta para impulsar el desarrollo geotérmico en la zona. Desde 2009, Geotermia Andina ha estado efectuando trabajos preliminares para reanudar la exploración geotérmica en la zona incluyendo sondeos geoelectrónicos (SEV) adicionales y mediciones de control en los pozos de gradiente (G. Stangalino, Presidente de GASA., comunicación personal). Otra empresa privada (Estrella Minerales, en asociación con Estudio Garrido Abogados) parece tener interés en explorar algunas concesiones en el sector de Tocomar, pero no se conoce de actividades específicas realizadas hasta la fecha⁴².

³⁹ TermoAndes S.A., subsidiaria de la compañía chilena AES Gener.

⁴⁰ Aquater en 1981; Hidroproyectos-SETEC-CEPIC, en 1984; CREGEN, en 1988.

⁴¹ Geotermia Andina S.A. (GASA). Subsidiaria argentina de la empresa canadiense Andean Geothermal Power Inc.

⁴² <http://www.cronista.com/opinion/Avanza-la-geotermia-en-la-Argentina-20110112-0053.html>.

4. Potencial geotermo-eléctrico

Argentina no dispone de una evaluación detallada de su potencial geotérmico. Inclusive los proyectos más avanzados no cuentan con una estimación adecuada del potencial del recurso (cuadro 2).

El único dato disponible es la evaluación global efectuada por Gawell et al. (1999), la cual estima para Argentina un potencial variable entre 490 y 1.010 MWe, que podría aumentar hasta los 2.010 MWe en condiciones de desarrollo tecnológico más avanzado, no mejor especificado.

5. Situación actual y perspectivas de desarrollo

Después de un largo período de estancamiento, en los últimos cinco años han resurgido varias iniciativas para reactivar el sector geotermo-eléctrico en Argentina. El Gobierno Provincial del Neuquén está intentando reanudar los proyectos de Copahue y Domuyo involucrando a desarrolladores privados; el Gobierno Provincial de San Juan ha establecido una Unión Transitoria de Empresas (UTE) con la compañía minera Barrick y con la empresa GASA para impulsar el desarrollo del proyecto Los Despoblados; Los Gobiernos de Salta y Jujuy están en conversaciones con GASA para reactivar la exploración en la zona del Volcán Tuzgle y de Tocomar, mientras que el Gobierno Provincial de Mendoza adjudicó algunas concesiones de exploración geotérmica a la empresa canadiense Geothermal One (CEPAL, 2014).

Por parte del Gobierno Federal, la única institución que sigue manteniendo cierta actividad geotérmica es el SEGEMAR, que está apoyando la investigación de prospectos de baja entalpía, y en particular la exploración del prospecto Termas de Río Hondo para el cual se suponen también posibilidades de desarrollo eléctrico (Pesce et al., 2014; Pesce, 2015).

Las iniciativas resultaron sin embargo ser algo complejas, y hasta la fecha los avances han sido muy limitados. El Gobierno del Neuquén tuvo inicialmente éxito en Copahue con la adjudicación, mediante licitación internacional, del desarrollo del campo a la empresa canadiense Geothermal One (sucesivamente Earth Heat Resources Group), pero ésta se retiró después de un par de años. El recurso de Domuyo ha sido también ofertado a empresas privadas, pero no ha recibido interés, así que el Gobierno del Neuquén, con la colaboración del Gobierno Federal ha planificado la realización de un programa de investigaciones de superficie adicionales para mejorar el atractivo del proyecto, el cual está por ser ejecutado. El Gobierno de Mendoza asignó dos áreas de exploración geotérmica a Geothermal One, pero análogamente a lo que ocurrió en Copahue, la empresa se retiró del proyecto sin realizar avances significativos. La experiencia del Gobierno de San Juan con la UTE en Los Despoblados ha sido hasta ahora la más exitosa, en cuanto logró avanzar con la exploración en el área, involucrando en el proyecto también al potencial comprador de la energía⁴³. Sin embargo, allí también la situación se estancó después de la ejecución de un programa de pozos de gradiente.

Por otro lado, para alcanzar los objetivos de generación renovable establecidos, Argentina inició en 2009 el Programa Oficial de Energías Renovables (GENREN), encargando a la empresa estatal ENARSA a contratar mediante licitación pública al menos 1 GWe de capacidad de energía renovable, para ser vendida en la red a tasa fija por un período de 15 años. La iniciativa encontró amplio interés y participación del sector privado en las licitaciones, sin embargo dentro del programa GENREN sólo 30 MW han sido hasta ahora planificados derivar de la energía geotérmica, y éstos no han recibido ninguna oferta.

El acceso a los financiamientos es uno de los principales problemas para la mayoría de los proyectos en Argentina, debido a las condiciones macroeconómicas del país, que han generado dificultades para la movilización de capitales privados y en parte también de inversiones por parte de organismos internacionales. Las perspectivas de desarrollo para el sector geotermo-eléctrico no están por lo tanto muy definidas en este momento.

⁴³ Minera Argentina Gold S.A. (MAGSA), subsidiaria en Argentina de Barrick Gold Corp.

B. Estado Plurinacional de Bolivia

1. Reseña histórica de la investigación geotérmica

Las primeras evaluaciones del recurso geotérmico para usos energéticos en Bolivia remontan a mediados de los años '70, cuando el Servicio Geológico Boliviano (GEOBOL) inició la recopilación de información derivada de anteriores investigaciones mineras, para preparar un inventario de los sitios termales de la región andina del país. En ese entonces fueron identificadas más de 70 manifestaciones termales distribuidas entre la Cordillera Andina Occidental, el Altiplano y la Cordillera Andina Oriental, y se empezó a seleccionar zonas prioritarias para la exploración (Carrasco, 1975; Condoretti, 1984).

En 1976, la iniciativa pasó a la Empresa Nacional de Electricidad (ENDE), que con el apoyo del PNUD y del Gobierno de Italia⁴⁴ determinó los sitios más prometedores para la exploración del recurso geotérmico con fines energéticos. Las áreas de Laguna Colorada, Volcán Sajama y Valle del Río Empexa, todas ubicadas en la cordillera volcánica del SO de Bolivia, al borde con Chile, fueron consideradas las más interesantes para continuar con los estudios (Battocletti y Lawrence, 1999; Delgadillo, 2000).

Sucesivamente, entre 1978 y 1980, ENDE, con el apoyo de la CAF y la colaboración del Gobierno de Italia, efectuó estudios de pre-factibilidad en las áreas de Laguna Colorada y Valle del Río Empexa, identificando un gran potencial en el sector Sol de Mañana del área de Laguna Colorada. A partir de ese momento la actividad geotérmica en Bolivia se concentró en el proyecto de Laguna Colorada (o Sol de Mañana), donde las actividades siguieron con apoyo técnico y económico del Gobierno de Italia. En 1985 el ENDE inició un estudio de factibilidad en colaboración con el Ente Nacional de Electricidad de Italia (ENEL), otras compañías consultoras italianas y con la participación de la empresa petrolera boliviana YPFB, la cual puso a disposición los equipos de perforación. Entre 1988 y 1992 fueron perforados seis pozos a profundidad promedio de 1.500 m, los cuales confirmaron la existencia de un importante recurso geotérmico de alta temperatura. El proyecto estaba luego encaminado hacia la instalación de una planta geotermo-eléctrica piloto pero fue suspendido en 1993 debido a problemas políticos⁴⁵ (Battocletti y Lawrence, 1999; Delgadillo, 2000; Villaroel, 2014).

La actividad fue reanudada en Sol de Mañana en 1996-1997 cuando ENDE contrató a la Comisión Federal de Electricidad de México (CFE) para evaluar y certificar el potencial del recurso. Los estudios efectuados por la CFE determinaron la viabilidad de un desarrollo de 120 MWe durante 25 años y estimaron una capacidad potencial del campo superior a los 300 MWe (Delgadillo, 2000).

En la segunda mitad de los años '90 el Gobierno de Bolivia efectuó algunos intentos de desarrollar el campo geotérmico de Sol de Mañana con participación privada. En 1999 el proyecto fue asignado mediante licitación pública internacional a la empresa estadounidense Unocal Geothermal Ventures Ltd., pero la iniciativa no prosperó. El proyecto quedó luego inactivo por varios años, hasta que en 2007 el Gobierno de Bolivia inició negociaciones con la Agencia Internacional de Cooperación del Japón (JICA) para la instalación de una planta geotérmica en Sol de Mañana. El proyecto de cooperación se encuentra actualmente en fase avanzada de preparación, con previsión de iniciar la etapa de desarrollo a finales del 2015, para la puesta en marcha de una primera planta de 50 MWe en 2020 (Escobar, 2014). Mayores detalles sobre la historia y características del proyecto geotérmico Laguna Colorada se reportan en la sucesiva sección.

Con la concentración del interés, aún si intermitente, por más de 30 años sobre el proyecto de Laguna Colorada, la evaluación de otras oportunidades geotérmicas en el país ha sido marginal y limitada a estudios de superficie. Entre las principales actividades se mencionan las evaluaciones geoquímicas promovidas por la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA) en las áreas de Sajama y Río

⁴⁴ La empresa Geotecneco (sucesivamente Aquater) del Grupo ENI (Ente Nazionale Idrocarburi) efectuó estudios de reconocimiento geotérmico.

⁴⁵ Battocletti y Lawrence (1999) mencionan que el gobierno italiano canceló el financiamiento para la continuación del proyecto debido a problemas de corrupción en Bolivia.

Empexa (Scandiffio y Cassis, 1990; Scandiffio y Rodriguez, 1990); algunos estudios de reconocimiento geoquímico en áreas termales del Altiplano y de la Cordillera Andina Oriental (Capachos, Castilla-Huma, Pazña, Poopo, Sorocachi, Urimiri, Vichas-Lupe) efectuados en 1997-1998 por la National Rural Electric Cooperative Association (NRECA) de Estados Unidos (Battocletti y Lawrence, 1999); y una investigación de recursos geotérmicos en la región de Uyuni, para suministro de calor y energía a operaciones mineras, promovida en 2010 por la Corporación Minera de Bolivia (COMIBOL) con la colaboración del Ministerio de Economía industria y Comercio del Japón (JOGMEC et al., 2011). Este último estudio analizó con particular atención al área de Río Empexa, para la cual ya se contaba con las investigaciones a nivel de pre-factibilidad realizadas a finales de los años '70.

2. Marco legal

En Bolivia no existe regulación específica para la geotermia, y el marco legal del sector energético está todavía en fase de reorganización para adaptarse a las modificaciones de la Constitución efectuadas en 2009.

Según la constitución política los recursos naturales son definidos estratégicos, propiedad del pueblo boliviano y de interés público para el desarrollo del país. Su utilización corresponde al Estado en función del interés colectivo, por lo que cualquier actividad o inversión privada en el sector de los recursos naturales se debe hacer a través del Estado. En cuanto a la energía, la generación, transmisión y distribución están reservadas para el Estado, el cual puede desarrollarlas a través de empresas públicas, instituciones cooperativas mixtas sin fines de lucro, empresas privadas y empresas comunitarias con participación y control social. La cadena de la energía no puede ser exclusivamente sujeta a intereses privados, ni a concesiones, y la participación privada debe ser regulada por ley.

El Estado Boliviano tiene también el mandato de desarrollar y promover la investigación y el uso de nuevas formas de producción de energía, compatibles con la conservación del medio ambiente. Para tal fin existen planes con metas asignadas para el cambio de la matriz energética, mediante proyectos de investigación y desarrollo, planes estratégicos de inversión en proyectos de desarrollo energético a mediano y largo plazo⁴⁶. Según reportado por IRENA (2015b) la meta actual de Bolivia es la de aumentar del 10% la capacidad de generación renovable en la matriz energética durante los próximos cinco años.

La Empresa Nacional de Electricidad (ENDE), que es una corporación pública, nacional y estratégica, constituida en 1964 y refundada en 2008, es responsable para toda la cadena de la industria eléctrica, y directamente encargada para el desarrollo de proyectos geotérmicos.

3. Principales proyectos geotérmicos

Bolivia no cuenta con una evaluación integral de su potencial geotérmico, con identificación de proyectos y correspondientes perspectivas de desarrollo. Existe sin embargo un inventario de manifestaciones termales elaborado en los años '70 y evaluaciones generales que han permitido identificar los sectores del territorio nacional que son de mayor interés geotérmico.

Carrasco (1975) reporta que con base en las primeras evaluaciones efectuadas por el Servicio Geológico Boliviano a inicios de los años '70, las áreas de mayor interés geotérmico corresponden a la región meridional de la Cordillera Andina Occidental (Provincia de Lipez del Departamento de Potosí), el Altiplano Central (Oruro, Poopo, Pazña) y la Región de Chaquí, en la Cordillera Oriental, entre Potosí y Sucre. Estudios sucesivos (en 1976) llevaron a clasificar el sector de la cordillera volcánica cuaternaria del SO de Bolivia, como el más prospectivo para la exploración de recursos geotérmicos para uso energético, identificando las áreas de Volcán Sajama, Valle del Río Empexa, Salar de la Laguna, Volcán Ollague-Cachi, Laguna Colorada, Laguna Verde y Quetena. Las áreas de Laguna Colorada, Volcán Sajama y Valle de Río Empexa, fueron consideradas las más interesantes, por lo cual han sido sucesivamente objeto de investigaciones más avanzadas (Battocletti y Lawrence, 1999). Estas áreas han quedado hasta la fecha como los únicos proyectos geotérmicos con perspectivas de uso eléctrico claramente identificados en

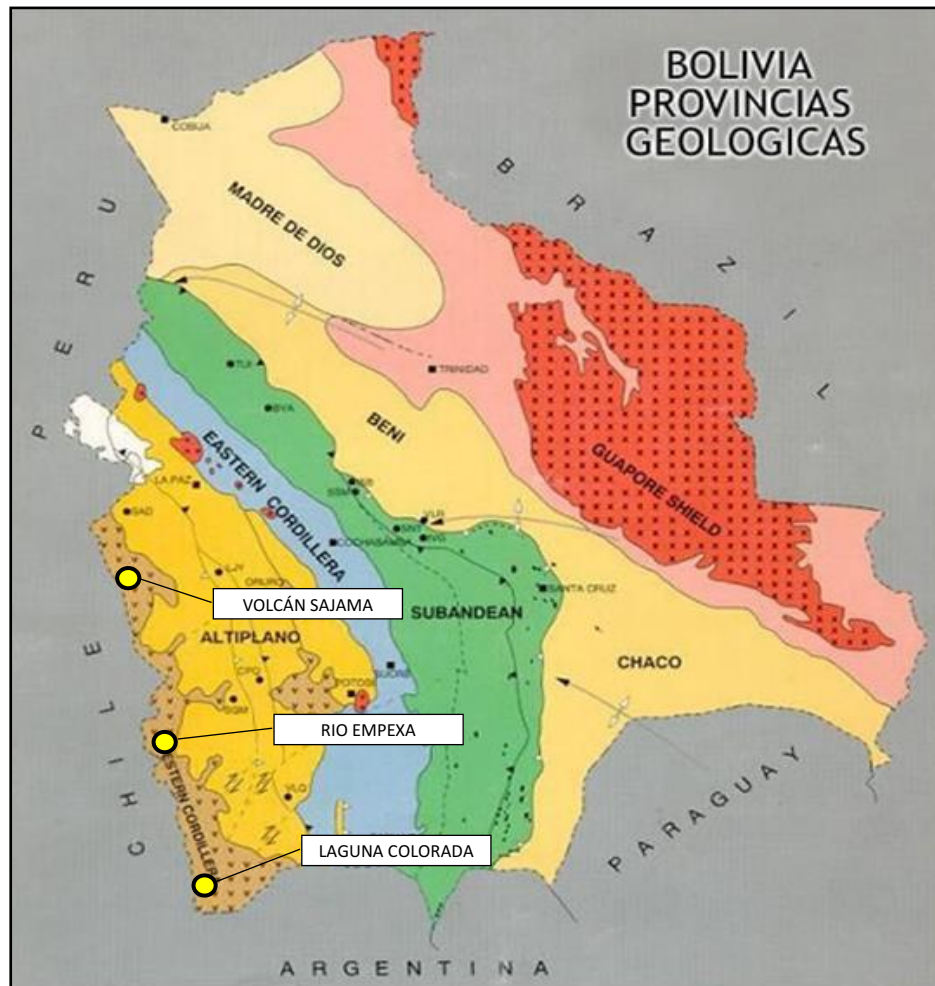
⁴⁶ Plan Eléctrico Estado Plurinacional de Bolivia 2025. <http://www.cndc.bo/media/archivos/boletines/peebol>.

Bolivia. Un reciente estudio en la región de Uyuni clasifica también a las áreas Salar de la Laguna y Pastos Grandes, como posibles candidatas para desarrollos geotermo-eléctricos con tecnología de ciclo binario, pero la información es todavía preliminar (JOGMEC et al., 2011).

Evidentemente la evaluación de los recursos geotérmicos de Bolivia necesita ser mejorada, por lo cual no se puede excluir que en el país existan otras áreas de interés, con potencial para generación geotermo-eléctrica, todavía no identificadas o insuficientemente investigadas.

La ubicación y principales características de las áreas conocidas con perspectivas de desarrollo geotermo-eléctrico se indican en el mapa 6 y en el cuadro 3, mientras que una breve descripción de las mismas se reporta a continuación.

Mapa 6
Provincias geológicas de Bolivia y ubicación de los principales proyectos con perspectivas de desarrollo geotermo-eléctrico



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los límites y los nombres que figuran en este mapa no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

Cuadro 3
Áreas geotérmicas con perspectivas de desarrollo eléctrico
del Estado Plurinacional de Bolivia

Provincia geológica	Región administrativa	Área geotérmica	Nivel de estudio	Temperatura estimada / medida (°C)	Potencial reportado (MWe)
Cordillera Andina	Potosí	Laguna Colorada	Factibilidad	250-260	280-370
Occidental	Potosí	Valle Río Empexa	Exploración superficie	180-200	10-15
	Oruro	Volcán Sajama	Reconocimiento	230-250	n.d.

Fuente: Elaboración propia.

Laguna Colorada

El campo geotérmico de Laguna Colorada se ubica en la extremidad sur-occidental de Bolivia, 250 km al sureste de la ciudad de Uyuni, en un sector muy remoto y despoblado de la alta cordillera andina, en proximidad del confin con Chile y Argentina (mapa 6). La denominación “Laguna Colorada” hace referencia a una reconocida laguna, de elevado valor ambiental y paisajístico, en proximidad de la cual fue construido en los años ‘80 el campamento de apoyo logístico para las operaciones del proyecto; sin embargo el campo geotérmico se encuentra unos 25 km más al sur, en los sectores conocidos como Sol de Mañana y Apacheta, a elevaciones entre los 4.800 y los 5.000 m s.n.m. A pesar de su localización muy remota, el área es accesible desde la ciudad de Uyuni por caminos no pavimentados, en moderadas a buenas condiciones, debido a la significativa actividad turística y a la presencia de actividades extractivas en la región⁴⁷.

El proyecto de Laguna Colorada es uno de los más avanzados en América del Sur. El área se caracteriza por la presencia de un amplio sector de manifestaciones termales de alta temperatura en Sol de Mañana, y ha sido explorada, en diferentes etapas a partir de 1976, por el ENDE con la colaboración del PNUD, de la CAF y del Gobierno de Italia. El proyecto cuenta actualmente con 6 pozos de diámetro comercial, perforados entre 1987 y 1992, con profundidad variable entre 1.180 y 1.726 m, los cuales han demostrado la presencia de un extenso reservorio geotérmico de tipo “agua dominante”, con temperatura de 250-260°C, hospedado en secuencias volcánicas a profundidades mayores de 800-900 m. La mayoría de los pozos resultaron productivos, con una capacidad de generación en el rango de 6-8 MWe cada uno. En 1996-1997 la CFE de México, efectuó una evaluación del recurso por cuenta del ENDE certificando la viabilidad de un desarrollo de 120 MWe por 25 años, y estimando una capacidad potencial del campo superior a los 300 MWe (Delgadillo, 2000). Estudios realizados sucesivamente por JICA (en 2008) confirmaron la factibilidad de una planta de 100 MWe por un período de 30 años (Villaroel, 2014).

A pesar del importante recurso y de los resultados muy prometedores de la exploración, el proyecto en Laguna Colorada no ha logrado ser desarrollado durante los más de 30 años que transcurrieron desde su identificación a finales de los años ’70. Su posición remota, que implica un largo tramo de interconexión eléctrica, el bajo costo de la energía en el país, generada con gas natural e hidroelectricidad, y diversos factores políticos, han constituido las principales dificultades. El desarrollo del campo fue inicialmente programado a principios de los años ’90, con planes del ENDE para instalar una planta de 30 MWe financiada por del Gobierno de Italia, pero la actividad fue luego abandonada (Di Paola, 1990; Battocletti y Lawrence, 1999; Delgadillo, 2000; Villaroel, 2014). En la segunda mitad de los años ’90 el Gobierno de Bolivia efectuó también algunos intentos para desarrollar el campo geotérmico de Sol de Mañana mediante la participación de empresas privadas. Una primera licitación

⁴⁷ La importante mina polimetálica de San Cristóbal se encuentra 160 km al NNE de Sol de Mañana, mientras que en salares cercanos se extrae bórax, que es procesado para la producción de ácido bórico en el sitio de Apacheta, utilizando el calor de uno de los pozos geotérmico del proyecto Laguna Colorada. La Laguna Colorada y las manifestaciones termales de Sol de Mañana están entre los principales atractivos a lo largo de la ruta turística que conecta Uyuni con San Pedro de Atacama, en Chile.

pública internacional fue declarada desierta en 1995 debido al valor muy bajo de la única oferta⁴⁸, mientras que en una sucesiva licitación internacional, en 1999, el proyecto con sus activos y concesión para el aprovechamiento del recurso geotérmico fue adjudicado a la empresa estadounidense Unocal Geothermal Ventures Ltd⁴⁹. Sin embargo, también en esta ocasión, las actividades no prosperaron y la empresa se retiró del proyecto poco después. Unocal apostaba en ese momento a un modelo de desarrollo inicial del campo basado en la generación de electricidad para el complejo minero de San Cristóbal⁵⁰, pero la licitación para ese suministro energético fue adjudicada a otra fuente de generación.

El proyecto de Laguna Colorada quedó luego inactivo por varios años. En 2006 el Gobierno de Bolivia recibió apoyo de la CEPAL para evaluar el estado del proyecto y sus perspectivas de desarrollo (CEPAL, 2006), y sucesivamente retomó acción gestionando la reactivación del proyecto con la cooperación del Gobierno del Japón. En 2007-2008 fue revisada la evaluación del recurso mediante un estudio de factibilidad realizado por la empresa japonesa West-Jec, por cuenta del Ministerio de Economía Comercio e Industria y de la Organización de Comercio Exterior (JETRO) del Japón, el cual confirmó la viabilidad de un desarrollo comercial de 100 MWe durante 30 años (ENDE, 2008). Siguió luego negociaciones con el Gobierno del Japón para el financiamiento del desarrollo geotermo-eléctrico. En 2010 se completó la evaluación ambiental del proyecto y de la línea de transmisión para la evacuación de energía hasta la subestación de la red nacional en San Cristóbal, y en 2012 se dio inicio a una fase de evaluación del estado actual mediante mediciones y pruebas de producción de los pozos existentes (Escobar, 2014; Villaroel, 2014).

Finalmente, en julio de 2014, el Gobierno de Bolivia firmó un contrato de préstamo con JICA a ser ejecutado por ENDE, para el desarrollo de una primera etapa de 50 MWe en Sol de Mañana⁵¹. El proyecto está actualmente en fase de organización, con la contratación de una empresa consultora para la implementación del proyecto. Las actividades han sido planificadas para iniciar antes de finales del 2015 y llegar a la puesta en operación de la primera planta de 50 MWe en 2020 (Escobar, 2014), sin embargo parece que han sufrido algunos atrasos, dado que al primer trimestre del 2016 no hay todavía evidencias de que el proyecto haya efectivamente entrado en su fase de ejecución.

El programa global de desarrollo planteado por el ENDE, de conformidad con la planificación energética nacional, prevé la instalación de dos unidades de generación de 50 MWe cada una por un total de 100 MWe. En una etapa inicial está prevista también la instalación de una planta piloto de aproximadamente 5 MWe (Escobar, 2015).

Cabe observar que el área geotérmica de Laguna Colorada se encuentra al interior de la Reserva Nacional de Fauna Andina Eduardo Avaroa, la cual fue creada en 1973 para proteger a la Laguna Colorada y sucesivamente ampliada en 1981⁵² para abarcar un sector más amplio de la alta cordillera andina del SO de Bolivia. La Laguna Colorada fue además instituida “Sitio Ramsar” en 1990 y está protegida bajo el tratado internacional para la conservación de humedales.

Río Empexa

La zona de Río Empexa se encuentra al borde del altiplano en el suroeste de Bolivia, unos 170 km al oeste de la ciudad de Uyuni, cerca del confín con Chile (mapa 6). Se trata de un área remota, actualmente despoblada, que en el pasado fue objeto de actividad minera (extracción de azufre). La zona es accesible desde Uyuni, cruzando el salar, mediante caminos secundarios, que son localmente fangosos y en modestas condiciones.

⁴⁸ Decreto Supremo N° 24065, del 6 de julio de 1995. Gonzalo Sánchez de Lozada Presidente Constitucional de la República. Disponible en: www.gacetaoficialdebolivia.gob.bo/normas/descargarPdf/21536.

⁴⁹ Decreto Supremo N° 25315, del 26 de febrero de 1999. Hugo Banzer Suarez, Presidente de la República. Disponible en: <http://www.lexivox.org/norms/BO-DS-25315.xhtml>.

⁵⁰ Mina San Cristobal, importante yacimiento polimetálico (zinc-plomo-plata) ubicado unos 160 km al norte de Laguna Colorada. La explotación minera, cuya operación requiere de 54 MW de potencia, estaba en fase inicial de desarrollo a finales de los años '90. La producción inició en 2007 y alcanzó el 100% de la capacidad de diseño en 2009. (<http://www.minerasancristobal.com>).

⁵¹ http://www.jica.go.jp/english/news/press/2014/140703_01.html.

⁵² Ver mayores detalles en: http://www.sernap.gob.bo/index.php?option=com_content&view=article&id=93&Itemid=274.

El sector de interés geotérmico se desarrolla a elevaciones de 3.700-3.900 m s.n.m., alrededor del margen meridional del Salar de Empexa, donde se encuentran diferentes zonas de alteración hidrotermal y manifestaciones termales con temperatura de ebullición. Las zonas de mayor actividad termal se ubican en el flanco norte del Cerro Cayte, en los sectores de Towa, con fuentes termales de hasta 88°C, y El Desierto, donde se encuentran débiles fumarolas en correspondencia de una mina de azufre abandonada (Mina Concepción). El Cerro Cayte es un edificio volcánico cuaternario con edad menor a 0,1 Ma; otros edificios volcánicos cercanos presentan evidencias de actividad post-glacial (Scandiffio y Cassis, 1990; JOGMEC et al., 2011).

El prospecto geotérmico de Río Empexa es conocido desde mediados de los años '70, cuando iniciaron las primeras investigaciones geotérmicas en Bolivia y fue seleccionado entre las tres áreas de mayor interés para la realización de estudios más avanzados. Entre 1978 y 1980 el área fue objeto de un estudio de pre-factibilidad el cual incluyó investigaciones geológicas, geoquímicas, geoelectricas (SEV) y la perforación de seis pozos de gradiente a profundidades de 60-165 m. En dos de estas perforaciones se registraron temperaturas superiores a los 100°C (max. 125°C). Los resultados del estudio de pre-factibilidad fueron considerados promisorios para la existencia de un reservorio geotérmico con temperatura de 230-240°C, alojado a 800-1.000 m de profundidad (síntesis de estudios anteriores en JOGMEC et al., 2011). Sin embargo el proyecto no continuó, dado que los esfuerzos fueron en ese entonces concentrados en el sitio más prometedor de Laguna Colorada.

En 1986 un estudio promovido por la OIEA revisó el contexto hidro-geoquímico del área geotérmica de Empexa, mediante nuevos muestreos de aguas y gases termales. Los resultados enfatizaron que la circulación a niveles someros de aguas sulfáticas asociadas con zonas de alteración hidrotermal ricas en azufre, y aguas salinas del Salar de Empexa, generan procesos de mezcla que hacen muy difícil interpretar las características originales del fluido termal profundo. En todo caso, según los resultados del estudio, la temperatura máxima calculable para el reservorio geotérmico con base en la información disponible en superficie no debería superar los 180°C (Scandiffio y Cassis, 1990).

El área fue luego re-evaluada en 2010 en el marco de un proyecto promovido por la COMIBOL, financiado por el Ministerio de Economía industria y Comercio del Japón y ejecutado por JOGMEC, con el objetivo de determinar las perspectivas de uso de recursos geotérmicos en la región de Uyuni, para suministro de calor y energía a operaciones mineras (explotación de depósitos evaporíticos, Litio en particular). El proyecto llevó a cabo estudios geológicos y geoquímicos adicionales⁵³ para determinar la viabilidad de un desarrollo geotermo-eléctrico en la zona de Río Empexa. En cuanto a la temperatura del recurso, este estudio llegó a conclusiones similares a las de Scandiffio y Cassis (1990), determinando una temperatura geoquímica en el rango de 170-200°C. El estudio incluyó también una evaluación del potencial del recurso y un plan de desarrollo para una central geotérmica conectada a la red eléctrica nacional en correspondencia de una planta de procesamiento de litio ubicada en Río Grande, en la orilla meridional del Salar de Uyuni (145 km de línea de transmisión). La evaluación de potencial fue efectuada mediante el método volumétrico-estadístico, estimando una capacidad de generación eléctrica más probable entre 10 y 15 MWe; 10 MWe con una probabilidad del 90% y 15 MWe con una probabilidad del 60% (JOGMEC et al., 2011).

Volcán Sajama

El área geotérmica de Sajama se encuentra en la cordillera occidental de Bolivia, 220 km al suroeste de La Paz y unos 200 km al oeste de la capital departamental de Oruro, en una zona alejada pero con muy buenas condiciones de acceso, por encontrarse en proximidad de la ruta internacional pavimentada que conecta La Paz con Arica, en Chile (mapa 6).

El sector de interés geotérmico se desarrolla a elevaciones de 4.200-4.500 m s.n.m. en una amplia cuenca comprendida entre el Volcán Sajama, al este, y la cadena de volcanes Parinacota-Pomerape-Kunturiri al oeste, la cual marca el confín con Chile. El prospecto se caracteriza por la

⁵³ Las nuevas investigaciones fueron enfocadas en la interpretación de imágenes satelitales ASTER, dataciones de rocas volcánicas, estudios de alteraciones hidrotermales y manifestaciones termales, muestreo e interpretación geoquímica de aguas y gases termales. No fueron efectuados estudios geofísicos.

presencia de numerosas manifestaciones termales, activas y fósiles, con temperatura variable entre 50°C y 87°C. La zona de mayor actividad termal se ubica en la base del flanco meridional del Cerro Kunturiri (o Condoriri), en un tramo de 2 km a lo largo del Río Juntuhuma, donde son reportados más de cincuenta manantiales, muchos de ellos en ebullición. El Cerro Kunturiri es un edificio volcánico pleistoceno (0,65 Ma) caracterizado por actividad explosiva con emisión de grandes volúmenes de riolitas y riodacitas. Otros edificios volcánicos cercanos a la zona termal, como el Parinacota y el Pomerape (Nevados Payachata, 10-13 km al SO), son más recientes y se caracterizan por significativa actividad post-glacial (Clavero et al., 2004; Scandiffio y Rodriguez, 1990).

El sitio fue inicialmente identificado a mediados de los años '70 durante el programa nacional de evaluación de recursos geotérmicos llevado a cabo por ENDE con la colaboración del PNUD y del Gobierno de Italia. En ese entonces fue seleccionado entre las tres áreas de mayor interés geotérmico en Bolivia, para la realización de estudios más avanzados. Sucesivamente fue objeto de investigaciones geológicas y geoquímicas en la segunda mitad de los años '70 y en 1988, efectuadas por ENDE con la colaboración del Gobierno de Italia y de la OIEA. Ulteriores estudios fueron realizados por GEOBOL en 1992-1993 (Battocletti y Lawrence, 1999). No se conoce de investigaciones geotérmicas más recientes en el área.

La información más significativa disponible para el área geotérmica de Sajama es posiblemente el informe patrocinado por la OIEA en 1988, el cual incluye una síntesis de la situación geológica y vulcanológica del área y los resultados de un estudio geoquímico completo de las manifestaciones termales presentes en el área (Scandiffio y Rodriguez, 1990). Según los resultados de este estudio, el contexto geovulcanológico del área, las características de las manifestaciones termales, la química y la composición isotópica de las fuentes termales del Río Juntuhuma son típicamente consistentes con la descarga en superficie de un sistema geotérmico de alta temperatura. Los geotermómetros iónicos indican temperaturas del recurso entre los 230°C y los 250°C.

El área de mayor interés geotérmico se encuentra al interior del Parque Nacional Sajama, creado en 1939 (primera área protegida en Bolivia) con el objetivo de conservar los ecosistemas altoandinos. El parque es actualmente uno de los destinos turísticos más importantes de Bolivia.

4. Potencial geotermo-eléctrico

Bolivia no dispone de una evaluación detallada de su potencial geotérmico a nivel nacional. El único dato disponible es la evaluación global efectuada por Gawell et al. (1999), la cual estima un potencial variable entre 510 y 1.260 MWe, que podría sin embargo aumentar hasta los 2.490 MWe en condiciones de desarrollo tecnológico más avanzado, no mejor especificadas.

Para los proyectos de Laguna Colorada y Río Empexa se cuenta con estimaciones de potencial mediante método volumétrico-estadístico, las cuales proporcionan respectivamente valores de 280-370 MWe (Delgadillo, 2000) y 10-15 MWe (JOGMEC et al., 2011).

5. Situación actual y perspectivas de desarrollo

La legislación boliviana reserva el control de todas las actividades de la industria eléctrica al Estado, dejando muy poco espacio para la participación privada. El desarrollo de la generación geotérmica está por lo tanto esencialmente relacionado con los esfuerzos e iniciativas que emprenda el Gobierno, mediante el ENDE.

Después de un largo período de estancamiento, a partir de 2006-2007 el Gobierno de Bolivia ha retomado una posición determinada hacia el desarrollo de la geotermia y, con el apoyo del Gobierno del Japón, ha reactivado el proyecto de Laguna Colorada, el cual es el más avanzado y prometedor en el país. En julio de 2014, el Gobierno de Bolivia firmó un contrato de préstamo con JICA, para la instalación de una primera planta de 50 MWe en Sol de Mañana, con planes de dar inicio a las actividades en la segunda mitad del 2015. La ejecución del proyecto ocupará significativamente a las estructuras de ENDE hasta el 2020, y posiblemente más, si continua con la segunda fase programada de 50 MWe adicionales.

No se conocen planes concretos para el desarrollo de otros proyectos geotérmicos en Bolivia, pero es interesante reportar que, de acuerdo a noticias en medios informativos, en Agosto de 2014 el Presidente de Bolivia promovió públicamente la investigación del área geotérmica del Volcán Sajama⁵⁴, y en febrero del 2015, Bolivia y Costa Rica firmaron un memorándum de entendimiento en el campo de la energía geotérmica, con objetivo de que el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) proporcione asistencia técnica al ENDE en la formación de recursos humanos y para la identificación del potencial geotérmico del país⁵⁵.

C. Chile

1. Reseña histórica de la investigación geotérmica

Chile ha sido un país pionero en el sector de la energía geotérmica. En 1908 miembros de la colonia italiana en Antofagasta crearon una sociedad privada, llamada Comunidad Preliminar de El Tatio, que efectuó las primeras exploraciones geotérmicas en el país. Entre 1921 y 1923 dicha sociedad, con el apoyo de técnicos italianos experimentados en el campo de Larderello, perforó dos pozos de 70-80 m en la zona de El Tatio, con la intención de iniciar un proyecto de generación de electricidad para las industrias mineras atacameñas (Tocchi, 1923, Lahsen et al., 2005).

El proyecto de la Comunidad Preliminar de El Tatio al fin no prosperó y pasaron luego casi cincuenta años antes de que surgiese nuevamente el interés para la geotermia en el país. En 1968, a raíz de un convenio suscrito entre el Gobierno de Chile y las Naciones Unidas (PNUD), la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) creó un “Comité para el Aprovechamiento de la Energía Geotérmica” y dio inicio a un programa de exploración sistemática de manifestaciones termales en el Norte Grande de Chile. Después de una fase inicial de reconocimiento, los esfuerzos fueron concentrados en los sitios del Salar de Surire, El Tatio y Puchuldiza, con la ejecución de investigaciones geológicas, geoquímicas y geofísicas, y luego con perforaciones en El Tatio y Puchuldiza (Lahsen et al., 2005).

En El Tatio, entre 1969 y 1971, fueron perforados seis pozos de diámetro reducido (650-750 m de profundidad), seguidos entre 1973 y 1974, por 7 pozos de producción (870-1.820 m de profundidad) los cuales confirmaron la existencia de un recurso geotérmico de alta temperatura. En Puchuldiza fueron perforados cinco pozos exploratorios (428-1013 m de profundidad) entre 1974 y 1977, con modestos resultados, luego el proyecto continuó con la cooperación del Gobierno del Japón que financió la ejecución de investigaciones geofísicas adicionales y la perforación de un sexto pozo en 1980, el cual encontró mayor temperatura pero no permitió confirmar la existencia de un recurso comercialmente explotable (Lahsen y Trujillo, 1975; JICA, 1981; Lahsen et al., 2005; Ministerio de Minería de Chile, 2008).

Los buenos resultados obtenidos en El Tatio llevaron a la ejecución de un estudio de factibilidad en 1975 y alimentaron programas para la instalación de una planta geotermo-eléctrica de 15-17 MWe, los cuales fueron llevados en 1978 hasta la licitación para contratar a una firma consultora, pero que al final no fue adjudicada. Es interesante mencionar también que en 1974 fue puesta en operación en El Tatio una planta piloto de desalinización, donada por el Gobierno del Reino Unido, para evaluar la posibilidad de producir agua potable a partir del vapor geotérmico y además estudiar formas de obtener elementos o compuestos químicos de valor económico desde el fluido geotérmico (Lahsen y Trujillo, 1975).

En 1982 el Comité para el Aprovechamiento de la Energía Geotérmica fue clausurado, implicando la suspensión de la actividad geotérmica a nivel nacional (Lahsen y Trujillo, 1975; Ministerio de Minería de Chile, 2008). Sucesivamente, la actividad quedó limitada a investigaciones científicas realizadas en varias áreas de interés geotérmico por universidades nacionales y extranjeras y por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). Entre las contribuciones más relevantes hubo la compilación, por

⁵⁴ <http://www.thinkgeoenergy.com/new-geothermal-project-eyed-in-sajama-bolivia/>.

<http://piensageotermia.com/bolivia-apunta-a-una-nueva-zona-con-potencial-geotermico-sajama/>.

⁵⁵ http://www.erbol.com.bo/noticia/economia/27022015/bolivia_y_costa_rica_acuerdan_trato_para_energia_geotermica.
<http://piensageotermia.com/costa-rica-y-bolivia-cooperaran-en-el-desarrollo-de-la-geotermia>.

parte del SERNGEOMIN, de un catastro nacional de aguas termales y minerales que fue publicado en 1997 y 1999 (Hauser, 1997; Pérez, 1999).

El interés para la geotermia volvió a activarse en los sectores políticos e institucionales chilenos a principios de los años '90. En diciembre de 1991 el Gobierno de Chile sometió al Congreso un proyecto de ley para regular la exploración y explotación de recursos geotérmicos, y al mismo tiempo la exploración geotérmica en el país fue reanudada por la Empresa Nacional de Petróleo (ENAP) con el apoyo de compañías extranjeras. En 1993 ENAP efectuó un reconocimiento de áreas geotérmicas en la zona central de Chile en colaboración con la compañía francesa CFG, el cual llevó a seleccionar el área de los Nevados de Chillán para la realización de estudios más avanzados. Las investigaciones en Chillán culminaron en 1995 con la perforación de un pozo somero (274 m de profundidad) que encontró vapor a 198°C. El pozo fue luego clausurado en 1996 por razones de seguridad y el proyecto ENAP-CFG no continuó. En la segunda mitad de los años '90 ENAP siguió con actividades de reconocimiento geotérmico en colaboración con la compañía estadounidense UNOCAL (Lahsen et al, 2005; Salgado y Raasch, 2002).

Los intentos, durante los años '90, de reactivar el sector geotérmico mediante ENAP en asociación con empresas privadas fueron limitados por la falta de un marco regulatorio para la industria geotérmica, dado que el proyecto de ley formulado en 1991 tardó ocho años para convertirse en la Ley sobre Concesiones de Energía Geotérmica⁵⁶. La Ley fue finalmente promulgada en diciembre de 1999 y publicada en enero del año 2000, constituyendo un hito fundamental para la activación del sector y su apertura a la iniciativa privada. La Ley estableció reglas para concesiones de exploración y explotación y limitó los emprendimientos geotérmicos de ENAP a asociaciones con otras compañías en las cuales la empresa estatal tuviese una participación accionaria inferior al 50%. La Ley también creó una provisión especial para acceder a concesiones con derecho preferencial, para las entidades que habían efectuado exploraciones geotérmicas en el país con anterioridad. Bajo esta provisión, diferentes entidades como ENAP, CFG, la Universidad de Chile y la CORFO, obtuvieron concesiones de exploración en las principales áreas geotérmicas conocidas en Chile. La Ley quedó sin embargo sin reglamento hasta en el 2004.

Bajo las disposiciones de la nueva Ley, ENAP continuó su actividad formando las sociedades Geotérmica del Norte S.A. (GDN), con la empresa minera estatal CODELCO, para la exploración de prospectos en el Norte de Chile, y Empresa Nacional de Geotermia (ENG), con la compañía francesa CFG, para continuar con el proyecto en Chillán (Raasch, 2001). ENAP concentró inicialmente la atención en el campo geotérmico de El Tatio y su extensión hacia el sureste (sector La Torta), donde llevó a cabo nuevas investigaciones geofísicas y dio inicio a un programa para la perforación de dos pozos exploratorios. Adicionalmente GDN y ENG iniciaron a explorar dos nuevas áreas en el norte (Apacheta) y centro (Calabozos) de Chile. La actividad geotérmica de ENAP fue luego suspendida a finales del 2002 por cuestiones políticas, dejando en El Tatio dos plataformas listas para dar inicio a trabajos de perforación que estaban en fase muy avanzada de preparación. En ese mismo período, otros avances en el sector fueron efectuados por la Universidad de Chile la cual efectuó investigaciones preliminares en concesiones propias en las zonas de Laguna del Maule y Puyehue-Cordón Caulle, y colaboró con ENAP en la ejecución de estudios en el área de Chillán.

En 2004 fue publicado el Reglamento de la Ley de Concesiones Geotérmicas, el cual completó el marco legal para la implementación y gestión del sector, creando finalmente las condiciones para que empresas nacionales y extranjeras pudieran entrar en el negocio geotérmico en Chile. A raíz de este evento, ENAP concretó en 2005 una nueva alianza con la empresa energética italiana ENEL para el desarrollo de proyectos de exploración y producción de energía geotérmica en Chile. La operación se materializó inicialmente mediante la adquisición por parte de ENEL del 51% de la participación accionaria en la Empresa Nacional de Geotermia S.A. Posteriormente, en marzo de 2006, la alianza se amplió con la adquisición por parte de ENEL del 51% de las acciones de

⁵⁶ Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Historia de la Ley No. 19.657, sobre Concesiones de energía Geotérmica. 7 de enero, 2000. Documento disponible en: https://www.google.com.ni/search?q=historia+ley+geotermia+chile&rlz=1C1GGGE_esNI539NI539&oq=historia+ley+geotermia+chile&aqs=chrome..69i57j69i60l5.4000j0j7&sourceid=chrome&es_sm=93&ie=UTF-8#.

Geotérmica del Norte S.A.⁵⁷. CFG se retiró y cedió a ENAP-ENEL todas las participaciones en concesiones de exploración geotérmica que tenía en el centro-sur de Chile, mientras que CODELCO quedó con una pequeña participación accionaria en GDN.

La nueva asociación ENAP-ENEL tomó así el control de la mayoría de proyectos geotérmicos más avanzados en el país (El Tatio-La Torta, Apacheta, Calabozo, Chillán), en los cuales inició una nueva fase de estudios y perforaciones. El interés fue nuevamente enfocado en El Tatio, donde, después de ulteriores estudios y evaluaciones técnicas y ambientales, fue reanudado el programa de perforaciones exploratorias que había sido abandonado en 2002, concentrando las operaciones en un sector alejado al sureste de los Géiseres de El Tatio, denominado Quebrada El Zoquete. En 2009 GDN completó con éxito un primer pozo, pero una falla técnica durante las pruebas de producción causó la erupción descontrolada de uno de los viejos pozos perforados por CORFO en los años '70, que estaba siendo utilizado como reinyector. Este hecho fue muy llamativo, recibió mucha atención por parte de los medios de comunicación y alimentó fuertemente la oposición al proyecto, la cual estaba ya de por sí muy sensible en cuanto a los potenciales impactos del desarrollo geotérmico sobre los Géiseres de El Tatio y la importante actividad turística relacionada. El evento no causó daños sustanciales y el pozo fue controlado y reparado, pero el impacto mediático, social y político fue tan significativo que el programa de perforación fue sucesivamente cancelado por GDN y la exploración geotérmica en el sector de El Tatio fue suspendida indefinidamente⁵⁸.

Paralelamente, a partir de 2004-2005, otras compañías nacionales y extranjeras ingresaron al mercado geotérmico chileno, solicitando concesiones, gatillando procesos de licitación e iniciando estudios en diferentes regiones del país, lo cual dinamizó fuertemente el sector. En este contexto, un evento relevante fue también la decisión de ENAP de impulsar la exploración geotérmica creando una nueva compañía (independiente de sus asociaciones con ENEL), la cual inició a operar en 2008 bajo el nombre de Energía Andina S.A. Dicha empresa fue inicialmente constituida por ENAP (40%) y la empresa minera chilena Antofagasta Minerals S.A. (60%), luego ENAP cedió en 2011 su participación a la empresa energética australiana Origin Energy⁵⁹.

Todas estas actividades llevaron a la identificación de varios prospectos geotérmicos, tanto en el norte como en el centro-sur de Chile, y al descubrimiento de nuevos campos geotérmicos, como en el Volcán Tolhuaca, por parte de Geoglobal Energy (sucesivamente Mighty River Power) en Volcán Pellado, por parte de Magma Energy (Alterra Power Corp.) y en el Volcán Tinguiririca, por parte de Energía Andina.

2. Marco legal

Chile es uno de los únicos dos países en América del Sur (el otro es Perú) que cuentan con un marco legal específico para la geotermia. La exploración y explotación de recursos geotérmicos en Chile son principalmente reguladas por la Ley sobre Concesiones de Energía Geotérmica, la cual entró en vigencia en enero del año 2000⁶⁰. El Reglamento para la aplicación de la Ley fue publicado cuatro años después, en abril del 2004⁶¹. El Ministerio de Energía, es la entidad encargada de la administración y control del sector geotérmico desde su creación en el 2010; anteriormente la función fue desempeñada por el Ministerio de Minería.

⁵⁷ <http://www.enap.cl/pag/57/987/geotermia>.

⁵⁸ <http://www.bnamericas.com/project-profile/es/el-tatio-geothermal-project-el-tatio>.
<http://www.thinkgeoenergy.com/el-tatio-project-in-chile-indefinitely-suspended/>.

⁵⁹ <http://www.energiandina.cl/empresa/presentacion-easa/>.

⁶⁰ Ley No. 19.657 Ley sobre Concesiones de Energía Geotérmica. Publicada en el Diario Oficial del 7 de enero del 2000.

⁶¹ D.S. No. 32 del Ministerio de Minería del 22 de abril de 2004. Aprueba reglamento para la aplicación de la ley No. 19.657, sobre concesiones de exploración y explotación de energía geotérmica. Publicado en el Diario Oficial del 28 de octubre del 2004.

Otro instrumento legal, que fue introducido junto con la Ley de Concesiones de Energía Geotérmica, es el decreto que definió las “fuentes probables” de energía geotérmica⁶², el cual identificó y delimitó 120 sitios prospectivos distribuidos en todo el país, a partir de un estudio efectuado por el SERNAGEOMIN. De conformidad con la Ley sobre Concesiones de Energía Geotérmica, el otorgamiento de concesiones en áreas de “fuente probable” requiere un proceso de licitación pública.

Durante los últimos diez años Chile ha estado experimentando su legislación geotérmica mediante licitación, otorgamiento y administración de numerosas concesiones, lo cual ha puesto progresivamente en evidencia ciertas debilidades de los instrumentos legales y administrativos. Por estas razones el Reglamento ha sido modificado en 2008⁶³, luego reformado sustancialmente en 2013, con la emisión de un nuevo reglamento⁶⁴, y en fin ulteriormente modificado en mayo del 2015⁶⁵.

El Ministerio de Energía está actualmente trabajando también en la revisión de la Ley, para perfeccionar el sistema de concesiones geotérmicas, asegurar el cumplimiento de los programas de exploración comprometidos por los concesionarios, evitar la especulación en el sector, facilitar la integración de la geotermia en contextos territoriales caracterizados por la presencia de comunidades locales y áreas protegidas, y estimular también el desarrollo de aplicaciones de energía geotérmica de baja entalpía. Este proyecto de ley estaba planificado para ser presentado al Congreso a finales del 2015 (Ministerio de Energía de Chile, 2014), pero ha tenido algunos atrasos.

La legislación chilena no prevé beneficios fiscales, y tampoco un sistema de tarifas reguladas (*feed-in tariff*), que incentiven en lo específico el desarrollo de la generación geotermo-eléctrica. Existe sin embargo un marco legal general para el fomento de las energías renovables, el cual determina condiciones en el mercado eléctrico que pueden favorecer también a la geotermia.

El marco legal para las energías renovables no convencionales (ERNC) fue establecido en 2008 mediante la Ley No. 20.257⁶⁶, que introdujo modificaciones a la Ley General de Servicios Eléctricos, para favorecer el desarrollo de la generación de energía eléctrica con ERNC (incluyendo a la geotérmica). Este marco legal ha sido ulteriormente modificado en 2013, mediante la Ley No. 20.698⁶⁷, para ampliar y fortalecer el régimen de fomento de las ERNC. Los principales beneficios derivan del mandato que establece una tasa de participación de las ERNC en el mercado eléctrico, la cual está planificada para alcanzar el 20% en el año 2025. Bajo este mecanismo, cada empresa que efectúe retiros de energía desde los sistemas eléctricos con capacidad instalada superior a 200 MWe, para comercializarla en el mercado, debe acreditar que cierto porcentaje (creciente en el tiempo, hasta el 20% en 2025) de sus retiros anuales derive de generación renovable no convencional, propia o contratada. Para apoyar el desarrollo de la generación con ERNC y el cumplimiento de los objetivos establecidos, la Ley estableció también un mecanismo de licitaciones públicas, a ser implementado por el Ministerio de Energía, para la provisión de bloques anuales de energía provenientes de generación con fuentes renovables no convencionales.

⁶² D.S. No. 142 del Ministerio de Minería del 28 de abril de 2000. Reglamento identifica fuentes probables de energía geotérmica. Publicado en el Diario Oficial del 28 de junio del 2000.

⁶³ D.S. No. 224 del Ministerio de Minería del 4 de diciembre del 2008. Modifica Decreto No. 32 que aprueba reglamento para la aplicación de la Ley No. 19,657, Ley sobre Concesiones de Energía Geotérmica. Publicado en el Diario Oficial del 26 de marzo del 2009.

⁶⁴ D.S. No. 114 del Ministerio de Energía del 15 de noviembre del 2012. Aprueba nuevo reglamento para la aplicación de la Ley No. 19,657, Ley sobre Concesiones de Energía Geotérmica y deroga Decreto No. 32 de 2004, del Ministerio de Minería. Publicado en el Diario Oficial del 8 de marzo del 2013.

⁶⁵ D.S. No. 46 del Ministerio de Energía del 7 de mayo del 2015. Modifica Decreto Supremo No. 114, de 2012, del Ministerio de Energía que aprueba nuevo reglamento para la aplicación de la Ley No. 19,657, sobre Concesiones de Energía Geotérmica y deroga Decreto No. 32 de 2004, del Ministerio de Minería. Publicado en el Diario Oficial del 3 de julio del 2015.

⁶⁶ Ley No. 20.257 introduce modificaciones a la Ley General de Servicios Eléctricos respecto de la generación eléctrica con fuentes de energías renovables no convencionales. Publicada en el Diario Oficial 1 de abril del 2008.

⁶⁷ Ley No. 20.698, Propicia la ampliación de la matriz energética mediante fuentes renovables no convencionales. Publicada en el Diario Oficial del 22 de octubre del 2013.

3. Principales proyectos geotérmicos

Chile cuenta con varios datos acerca de sus recursos geotermiales y con numerosas áreas de interés geotérmico, demostrado o supuesto, que están actualmente en fase de exploración por parte de empresas privadas o mixtas, público-privadas. No se cuenta sin embargo con una evaluación integral y unificada del recurso basada en un estudio de reconocimiento a nivel nacional de campos geotérmicos potenciales y correspondientes perspectivas de desarrollo. Esto se debe a que, con excepción de los primeros estudios geotérmicos efectuados en los años '60-'70 por CORFO, y limitados al norte de Chile, la mayoría del reconocimiento geotérmico a nivel nacional ha sido efectuado por la empresa estatal ENAP en asociación con empresas privadas o por empresas privadas de forma independiente, lo cual implica que mucha de la información más reciente y avanzada es protegida por razones comerciales y empresariales, y por ende, está limitadamente accesible.

Las contribuciones del SERNAGEOMIN en cuanto al reconocimiento del recurso geotérmico nacional son constituidas por el inventario de fuentes termales y minerales publicado en 1997 (Hauser, 1997), sucesivamente integrado por un estudio más detallado de las manifestaciones termales en la región andina centro-meridional de Chile (Pérez, 1999). Estos estudios caracterizan a más de 300 manifestaciones termales, varias de ellas situadas en zonas con volcanismo reciente y potencialmente asociadas con interesantes sistemas geotérmicos. Con base en dichos estudios, y para fines de aplicación de la Ley de Concesiones de Energía Geotérmica, el SERNAGEOMIN contribuyó también con la delimitación de 120 áreas de interés geotérmico distribuidas en todo el país, denominadas “fuentes probables”. Cabe sin embargo observar que las “fuentes probables” han sido definidas con el criterio de delimitar afloramientos espontáneos de aguas o vapores termales, sin considerar sus posibles relaciones con un sistema geotérmico. De hecho la mayoría de las “fuentes probables” son zonas de pocos km², que contienen una o pocas manifestaciones termales, y que no son necesariamente representativas de prospectos geotérmicos independientes.

Durante los últimos 10 años han sido otorgadas más de 80 concesiones de exploración y 9 concesiones de explotación (Santana, 2014; Allende, 2015), mientras que decenas de solicitudes siguen en proceso en el Ministerio de Energía⁶⁸. Estos números evidencian claramente el gran interés que surgió alrededor de la geotermia en Chile, pero no son muy significativos en cuanto a la cantidad efectiva de proyectos geotérmicos potencialmente desarrollables en el país. Varias de las áreas adjudicadas o solicitadas (especialmente para exploración) corresponden a zonas con pocos indicios geotérmicos, que han sido seleccionadas por la presencia de edificios volcánicos recientes y quizás algunas fuentes termales, o por estar adyacentes a otras zonas de reconocido interés geotérmico. En otros casos se trata de áreas múltiples y adyacentes que en su conjunto cubren una sola zona de interés geotérmico, las cuales derivan de varias situaciones, como por ejemplo: diferentes solicitudes sobrepuestas en una misma zona, luego subdividida en sectores para fines de licitación por el Ministerio de Energía; estrategias de las empresas para no interferir con fuentes probables (evitar una licitación) o para cubrir un área de interés en proximidad del confín nacional, respetando el criterio legal que admite solamente concesiones con forma de paralelogramo de ángulos rectos y con dos lados de orientación norte-sur. Las numerosas concesiones geotérmicas, corresponden por lo tanto a diferentes tipos de proyectos, variables entre campos geotérmicos con recurso confirmado, áreas con características geotérmicas prometedoras que están en fase de exploración, y áreas de supuesto interés geotérmico con pocas o muy pocas probabilidades de contener un recurso de interés comercial.

Con base en la información disponible en literatura (Battocletti y Lawrence, 1999; Salgado y Raasch, 2002; Lahsen et al., 2005; Aguilera, 2008; Hodgson, 2013; Procesi, 2014; Lahsen et al., 2015; entre otros) se identifican poco más de diez proyectos, en diferentes niveles de exploración, que presentan características claramente asociables con recursos de interés geotermo-eléctrico comercial. Los principales entre estos proyectos, se indican en el cuadro 4 y en la mapa 7, y se describen a continuación, con base en la información disponible y el conocimiento de los autores del presente documento.

⁶⁸ http://antiguo.minenergia.cl/minwww/opencms/02_Noticias/otros/concesiones_geotermicas.html. Consultado 10-09-2015.

No se excluye que, entre todas las concesiones actualmente en fase de exploración, puedan haber surgido otros proyectos con perspectivas similares, pero que no han sido todavía divulgados en medios públicos.

Cuadro 4
Áreas geotérmicas con perspectivas de desarrollo eléctrico de Chile

Provincia Geológica	Región administrativa	Área geotérmica	Nivel de estudio	Temperatura Estimada / medida (°C)	Potencial reportado (MWe)
Zona volcánica septentrional	Región I	Surire	Exploración superficie	230-260	50-140
	Región I	Pumiri	Perforación exploratoria	240-260	120-240
	Región I	Puchuldiza	Perforación exploratoria	240-275	30-190
	Región II	Apacheta	Factibilidad	260	50-140
	Región II	El Tatio - La Torta	Factibilidad	250-300	100-250
	Región VI	Tinguiririca	Perforación exploratoria	230-300	90-200
Zona volcánica centro-meridional	Región VII	Calabozo	Perforación exploratoria	235-300	80-200
	Región VII	Pellado	Perforación exploratoria	220-270	320
	Región VIII	Chillán	Perforación exploratoria	> 200	30-100
	Región IX	Tolhuaca	Factibilidad	290	40-150
	Región X	Cordón Caulle	Reconocimiento	160-300	n.d.

Fuente: Elaboración propia.

Surire

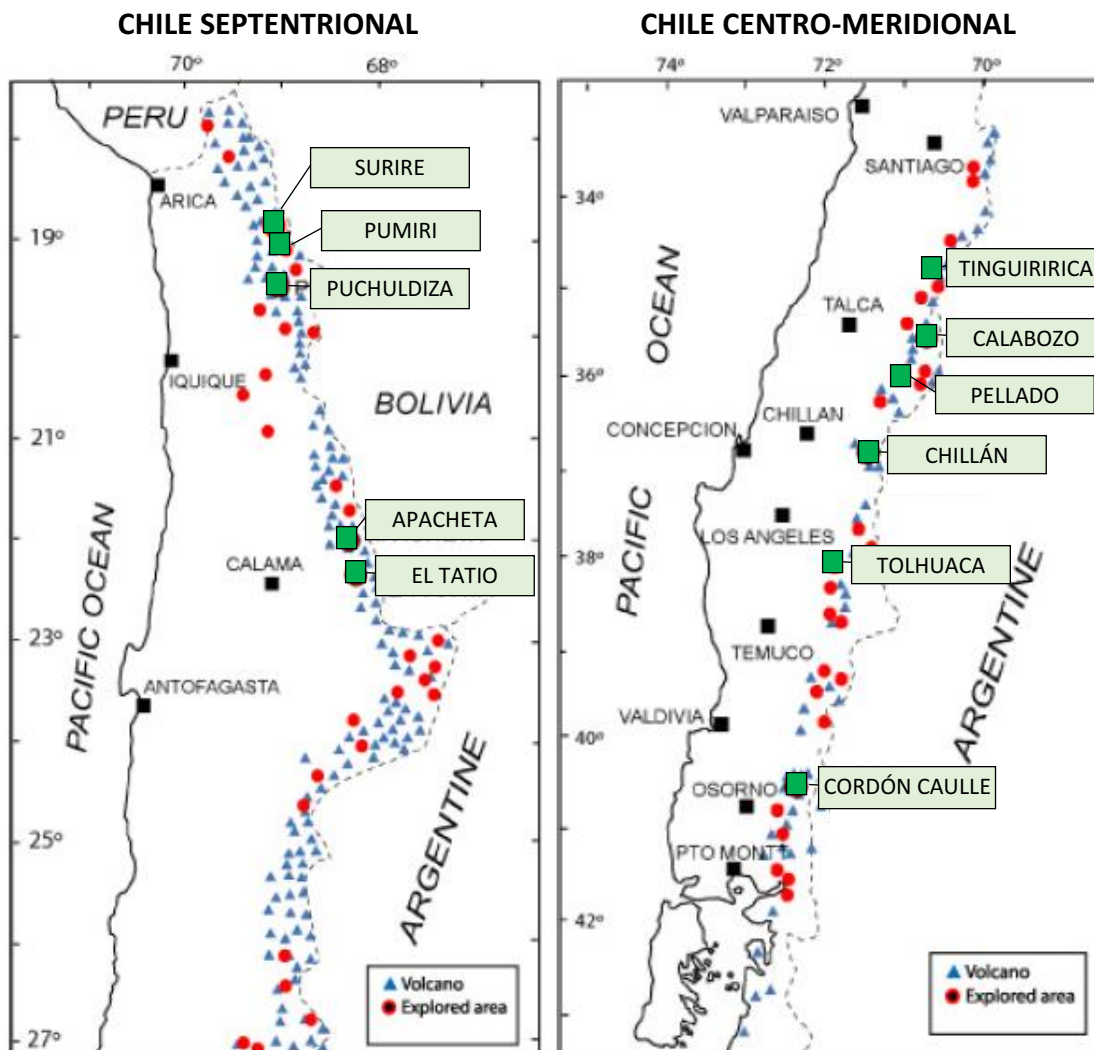
El área geotérmica de Surire, también conocida como Chiguana, o Polloquere, se encuentra en el altiplano del norte de Chile, unos 150 km al sur-este de la ciudad de Arica, en un sector remoto en las cercanías del confín con Bolivia, accesible mediante caminos secundarios (mapa 7). La zona geotérmica se extiende a elevaciones superiores a los 4.300 m s.n.m., en el sector inmediatamente al sur del Salar de Surire, el cual es un lugar de gran belleza escénica, declarado Monumento Nacional. La zona es también parcialmente incluida en la Reserva Nacional Las Vicuñas.

Surire se ubica en una amplia cuenca contornada por volcanes de edad pleistocena, profundamente alterados y erosionados. El prospecto geotérmico se caracteriza por la presencia de dos grupos de manifestaciones termales, uno ubicado en la ladera oriental del Volcán Chiguana y otro, pocos km más al norte, en la orilla meridional del Salar de Surire. Las manifestaciones más elevadas, en la ladera del volcán, son constituidas por una zona de alteración con suelos humeantes y débil actividad fumarólica sobrecalentada, mientras que en la orilla del salar se encuentran numerosos manantiales termales con importantes descargas de aguas cloruradas a temperaturas que superan localmente los 80°C (manantiales en ebullición).

Las manifestaciones termales de Surire han sido objeto de investigación desde los primeros estudios geotérmicos efectuados por CORFO en los años '70, cuando el área fue seleccionada, junto con El Tatio y Puchuldiza, entre los prospectos más atractivos en el norte de Chile, pero contrariamente a las otras dos áreas, en Surire las investigaciones no pasaron de la etapa de reconocimiento. En ese entonces fue reportada la presencia de una amplia zona termal al borde meridional del Salar de Surire, con 133 manantiales distribuidos en un sector de 15 km² (Trujillo, 1972); sin embargo varios de esos manantiales han desaparecido en tiempos sucesivos, debido al hundimiento del acuífero freático en la cuenca del salar por procesos naturales o asociados con la explotación del recurso hídrico (Aguilera, 2008).

Después de las evaluaciones preliminares en los años '70, no hubo actividad en Surire hasta en la segunda mitad de los años '90, cuando ENAP, en colaboración con UNOCAL, efectuó nuevos estudios, incluyendo una campaña geofísica con sondeos MT y TDEM. Los resultados de estos estudios no han sido publicados.

Mapa 7
Ubicación de los principales proyectos con perspectivas de desarrollo geotermo-eléctrico en Chile



Fuente: Lahsen et al., 2005 (modificado).

Nota: Los límites y los nombres que figuran en este mapa no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

El área geotérmica de Surire está actualmente controlada por la empresa Energía Andina, la cual obtuvo una concesión de exploración en 2009 a raíz de un proceso de licitación pública (Concesión Polloquere 1). Energía Andina ha llevado a cabo un programa de exploración superficial, con investigaciones geológicas, geoquímicas, hidrológicas y geofísicas que han permitido generar un modelo geotérmico preliminar del área y determinar la posible existencia y ubicación de un reservorio geotérmico en profundidad⁶⁹, sin embargo los resultados de los estudios no han sido publicados. Se conoce que Energía Andina encontró cierta oposición por parte de la comunidad de Surire, por lo cual la empresa no ha podido hasta la fecha completar su programa de exploración con perforaciones exploratorias.

La información sobre el recurso geotérmico de Surire es por lo tanto limitada, pero las características generales de las manifestaciones termales y los datos disponibles en literatura (Trujillo, 1972; Battocletti y Lawrence, 1999; Aguilera, 2008) definen un marco muy favorable para la existencia de un recurso de alta temperatura, con estimaciones geotermométricas en el rango de 230-260°C.

⁶⁹ <http://www.energiandina.cl/category/proyectos/chiguana/>. Consultado el 09-09-2015.

Battocletti y Lawrence (1999) reportan un potencial de 50-60MWe, mientras que Morata (2014) reporta con base en datos generados por el Consejo Geotérmico Chileno, un potencial en el rango 70-140 MWe; sin embargo ambas fuentes no indican la metodología utilizada para la estimación.

Pumiri

El área geotérmica de Pumiri, conocida también como Licancura, se encuentra en del norte de Chile, unos 145 Km al sureste de Arica y 170 km al noreste de Iquique, en un sector remoto de la cordillera andina, en las cercanías del confín con Bolivia (mapa 7). El área es fácilmente accesible tanto desde Arica como desde Iquique mediante caminos secundarios, y se extiende a elevaciones de 4.100-4.500 m s.n.m. en el flanco occidental del complejo volcánico Pumiri-Millacucho, el cual es un amplio edificio de edad pleistocena, profundamente alterado y erosionado.

La zona queda comprendida entre la Reserva Nacional Las Vicuñas, al norte, y el Parque Nacional Isluga, al sur-este, sin embargo el sector de mayor interés geotérmico no presenta interferencia con las áreas protegidas adyacentes.

Alrededor del complejo volcánico Pumiri-Millacucho se encuentran varias manifestaciones termales, pero las más importantes, con manantiales de aguas cloruradas que alcanzan los 80°C, se encuentran en la base de su ladera occidental, en las zonas de Pumiri y Punpunjire, que representan el sector de mayor interés geotérmico.

El proyecto de Pumiri es relativamente nuevo en el panorama geotérmico de Chile. Si bien las manifestaciones termales alrededor del complejo volcánico Pumiri-Millacucho fueron parcialmente investigadas ya en los años '70 por CORFO, la atención hacia esta zona surgió en tiempos recientes, cuando diferentes empresas solicitaron concesiones de exploración en la zona. El proceso de licitación pública que siguió (en 2009-2010) llevó a la subdivisión del área de interés geotérmico en tres bloques adyacentes, dos de los cuales (Polloquere II y Licancura I) fueron adjudicados a la empresa ENG y el otro, en posición central (Licancura III), a la empresa Transmark Chile. El área está por lo tanto siendo explorada por ambas empresas, que se supone controlen diferentes sectores del mismo sistema geotérmico.

Resulta que ENG y Transmark Chile hayan llevado a cabo investigaciones geológicas, geoquímicas y geofísicas, descubriendo un conjunto de numerosas manifestaciones termales y otros indicios de un interesante sistema geotérmico. Se conoce también que ENG ha perforado un pozo diamantino en cada una de sus dos concesiones, sin embargo los resultados de las exploraciones no han sido publicados. La única información accesible se encuentra en una tesis de graduación presentada en la Universidad de Chile (Maureira, 2013), que incluye un estudio detallado de la alteración hidrotermal y de la geoquímica de aguas termales en el sector occidental del Volcán Pumire. Los datos reportados en dicha tesis son prometedores y consistentes con la presencia de un típico sistema geotérmico de alta temperatura asociado a volcanismo, con un recurso que puede alcanzar los 240-260°C. Según Morata (2014), con base en datos generados por el Consejo Geotérmico Chileno, el potencial de las concesiones Polloquere II y Licancura III estaría en el rango 120-240 MWe, sin embargo no indica la metodología utilizada para la estimación.

Puchuldiza

El proyecto geotérmico de Puchuldiza se encuentra en el altiplano del Norte de Chile, 150 km al noreste de la ciudad de Iquique (mapa 7), en un sector remoto, pero fácilmente accesible, dado que está en proximidad de la ruta internacional que conecta la ciudad de Iquique con Oruro en Bolivia. El área de interés geotérmico se extiende en un amplio valle a elevación promedio de 4.300 metros s.n.m., rodeado por volcanes de edad Plio-Pleistocena. La actividad volcánica más reciente en proximidad del campo geotermal corresponde a una lava-domo en la cumbre del Volcán Latarani, datada 0,9 Ma (Cortéz et al., 2009). El Volcán Isluga, activo y con fumarolas permanentes en su cumbre, se encuentra unos 30 km al NE.

En la zona existen varias manifestaciones termales en forma de manantiales y pozas calientes con temperaturas comprendidas entre 40°C y 86°C (ebullición), las cuales se agrupan en dos sectores principales denominados Baños de Puchuldiza y Tuja. Los Baños de Puchuldiza, constituyen una

atracción turística popular, debido también a la presencia de un viejo pozo de exploración minera abandonado que emite un chorro de agua caliente hasta una altura de varios metros, formando llamativas formaciones de hielo durante las temporadas más frías.

Puchuldiza, junto con El Tatio, ha sido uno de los primeros proyectos geotérmicos a ser investigados en Chile. Los primeros estudios remontan a finales de los años 60, seguidos por perforaciones exploratorias durante la década de los '70, efectuadas por CORFO con la asistencia técnica y financiera del PNUD y de JICA. Después de la ejecución de estudios geocientíficos y la perforación de 8 pozos de gradiente térmico, en 1974-1977 CORFO perforó cinco pozos exploratorios (428-1013 m de profundidad)⁷⁰, los cuales encontraron un reservorio somero con temperaturas alrededor de los 160°C. Luego el proyecto continuó, entre 1979 y 1981, con la cooperación del Gobierno del Japón, que financió nuevas investigaciones geofísicas y la perforación de un sexto pozo. La nueva perforación fue ubicada en un sector distinto al de las anteriores; encontró mayor temperatura (200°C) pero baja permeabilidad, y no permitió confirmar la existencia de un recurso comercialmente explotable. Los estudios geoquímicos efectuados en esa época habían estimado la presencia de un reservorio profundo con temperaturas en el rango de 210-240°C (Lahsen et al., 2005; Ministerio de Minería de Chile, 2008; Ministerio de Minería de Chile, 2009). Estudios más recientes, basados en geotermometría de gases sugieren que en el sector de Tuja la temperatura del sistema geotermal en profundidad pueda alcanzar los 270°C (Tassi et al., 2010).

En 1982 la exploración en Puchuldiza fue abandonada, así como toda la actividad geotérmica en Chile. El interés para el proyecto no volvió a surgir hasta mediados de los años 2000, cuando diferentes empresas solicitaron concesiones de exploración en el área. Siguió un proceso de licitación efectuado por el Ministerio de Minería en 2006, el cual concluyó con la adjudicación a la empresa Minera Copiapó (Grupo Errázuriz) de dos concesiones adyacentes, denominadas Taipicollo y Tuja, en el sector al norte de las manifestaciones termales de Puchuldiza. No resulta que Minera Copiapó haya generado avances significativos en la exploración del área y las concesiones caducaron en los términos legales. Las únicas informaciones disponibles acerca de este período son contenidas en una memoria para optar al título de geólogo presentada en la Universidad de Chile, que incluye una recopilación y análisis de los resultados de estudios previos (Montenegro, 2008).

Paralelamente, durante 2007 y 2008, el SERNAGEOMIN llevó a cabo estudios geológicos, hidrogeológicos y geofísicos en el sector meridional de la zona de Puchuldiza, con el objetivo de incentivar la exploración geotérmica en el área. En octubre del 2009, a raíz de una licitación pública, el Ministerio de Minería otorgó dos nuevas concesiones, a las empresas Energía Andina, S.A. y Geoglobal Energy Chile (GGE Chile, sucesivamente MRP Chile), respectivamente denominadas Puchuldiza Sur 1 y Puchuldiza Sur 2.

Con base en información publicada por MRP Chile en su sitio web⁷¹, la empresa efectuó una serie de investigaciones geológicas, geoquímicas, geofísicas y ambientales, previas a la perforación de un pozo de pequeño diámetro en 2012, el cual alcanzó la profundidad de 563 m y encontró una temperatura superior a 150° C, lo cual es considerado por la empresa un resultado positivo que provee importante información sobre el reservorio geotérmico presente en la zona. MRP Chile reporta también que existen “relevantes evidencias geológicas de la ocurrencia de un recurso capaz de producir más de 100 MW de potencia, haciendo de Puchuldiza uno de los mayores recursos de energía geotérmica en Chile”. Battocletti y Lawrence (1999) reportan un potencial de 190 MWe, mientras que Morata (2014) con base en datos generados por el Consejo Geotérmico Chileno, reporta un potencial en el rango 30-100 MWe; sin embargo, ninguno de los autores indica la metodología utilizada para la estimación.

⁷⁰ Contrariamente a El Tatio, el proyecto CORFO-PNUD en Puchuldiza fue suspendido en 1972, al finalizar la fase de estudios de superficie, debido a problemas económicos. Las actividades reanudaron en 1974 con el apoyo del Gobierno de la Primera Región de Tarapacá, que financió la ejecución de cinco perforaciones exploratorias (Ministerio de Minería de Chile, 2009).

⁷¹ <http://geotermia.cl/proyecto/proyecto-greenfield/>.

En diciembre de 2013, MRP Chile solicitó al Ministerio de Energía una Concesión de Explotación para continuar con actividades en la zona, la cual está actualmente en proceso. Paralelamente la compañía solicitó también una concesión de exploración adicional, denominada Puchuldiza 3 y adyacente a Puchuldiza Sur 2, la cual fue otorgada por el Ministerio de Energía en 2014. Sin embargo, a finales del 2014, MRP anunció públicamente su retiro de los proyectos internacionales incluyendo a las actividades en Chile⁷², así que el futuro del proyecto está actualmente en fase de redefinición.

No se conoce de mayores actividades efectuadas por Energía Andina en su concesión de exploración Puchuldiza Sur 1, la cual abarca una zona de pequeñas dimensiones, marginal al sector de principal interés geotérmico, que parece ubicarse en Puchuldiza Sur 2.

Cabe en fin observar que la zona geotérmica de Puchuldiza se encuentra inmediatamente al sur del Parque Nacional del Volcán Isluga, sin embargo las concesiones Puchuldiza Sur 1 y 2 han sido delimitadas de manera que no se sobreponen al Parque Nacional.

Apacheta

El campo geotérmico de Apacheta, se encuentra en el norte de Chile, en la zona fronteriza con Bolivia, unos 120 km al noreste de la ciudad y centro minero de Calama, (mapa 7). Se trata de una zona remota y despoblada, pero con buena infraestructura de acceso debido a la presencia de campos de extracción de agua subterránea que alimentan a las minas de cobre ubicadas en la zona de Calama. En toda la zona no existen áreas protegidas.

El área de interés geotérmico se extiende a elevaciones de 4.500-5.200 m s.n.m., al interior de una depresión tectónica (Graben de Inacaliri) que abarca el flanco oriental del Cerro Apacheta y la planicie adyacente de Pampa Apacheta. El Cerro Apacheta constituye la parte más antigua, profundamente alterada y moderadamente erosionada, del complejo volcánico Apacheta-Aguilucho, de edad pleistocena. La actividad volcánica más reciente en el área es representada por dos domos dacíticos (Cerro Pabellón y Chac-Inca), con edad de 0,05-0,14 Ma, los cuales se encuentran en la base oriental del complejo volcánico, a lo largo de la falla de borde del Graben de Inacaliri (Mercado et al., 2009).

El prospecto geotérmico fue descubierto por casualidad a finales de los años '90, cuando durante los estudios de reconocimiento realizados por ENAP y UNOCAL en el norte de Chile se conoció que un pozo de agua perforado por CODELCO en Pampa Apacheta había encontrado vapor a la profundidad de 180 m (Salgado y Raasch, 2002). La evaluación preliminar del área llevó luego al descubrimiento de fumarolas sobrecalentadas (110-115°C) en la cumbre del Cerro Apacheta, 4,5 km al oeste del pozo perforado por CODELCO. El prospecto se volvió de esa manera muy llamativo. Las investigaciones continuaron por parte de la empresa GDN, recién formada entre ENAP y CODELCO, la cual obtuvo en 2002 una concesión para efectuar labores de exploración geotérmica en la zona. GDN llevó a cabo en ese período estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos (MT-TDEM) que llevaron a identificar importantes rasgos, consistentes con la existencia de un sistema geotérmico de alta temperatura (250-325°C con base en geotermómetros de gases - Urzua et al., 2002), y al final inició los preparativos para la perforación de un par de pozos exploratorios. Sin embargo, el proyecto no continuó debido a cuestiones políticas que determinaron la suspensión de las actividades geotérmicas de ENAP.

La exploración en Apacheta fue retomada pocos años después cuando ENAP estableció una asociación con la empresa italiana ENEL y retomó sus actividades en el sector geotérmico. A partir de 2006, GDN (conformada por ENEL, ENAP y CODELCO como socio minoritario) efectuó estudios geológicos y geofísicos adicionales y, a finales de 2007, perforó un pozo de diámetro reducido en la planicie de Pampa Apacheta, el cual encontró temperatura mayor de 200°C a 550 m de profundidad (Mercado et al., 2009).

Los buenos resultados dieron paso a la obtención de una concesión de explotación en 2009 y a la perforación, entre 2009 y 2010, de 4 pozos de diámetro comercial con profundidades entre 1.300 y

⁷² http://www.nzherald.co.nz/business/news/article.cfm?c_id=3&objectid=11375267.

2.000 m. Las pruebas de dichos pozos tuvieron resultados prometedores y confirmaron la existencia de un recurso con temperatura de hasta 260°C, por lo cual GDN procedió con la planificación de un proyecto de desarrollo comercial mediante una planta geotermo-eléctrica de aproximadamente 50 MWe, denominado Cerro Pabellón (Hodgson, 2013).

El proyecto cuenta actualmente con el permiso ambiental y todas las demás autorizaciones para su realización, así como con un contrato de compra-venta (PPA) para la inyección de energía en el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING). Según noticias publicadas por ENAP y ENEL⁷³, el 14 de Julio de 2015 GDN dio inicio a la fase de construcción de una central geotérmica constituida por dos unidades binarias de 24 MWe, la primera de las cuales entrará en operación en el primer trimestre del 2017 y la segunda en 2018, alcanzando una capacidad bruta total de 48 MWe. La inversión total estimada es de 320 MUS\$. Una sucesiva expansión de la planta hasta una capacidad de 100 MWe está siendo considerada.

GDN no difundió datos en cuanto al potencial global del recurso. Según Morata (2014), con base en datos generados por el Consejo Geotérmico Chileno, el potencial de la zona de Apacheta estaría en el rango 50-140 MWe, sin embargo no indica la metodología utilizada para la estimación.

El Tatio - La Torta

El campo geotérmico de El Tatio se encuentra en del norte de Chile, 95 km al este de la ciudad y centro minero de Calama y 65 km al norte de San Pedro de Atacama, en la zona fronteriza con Bolivia (mapa 7). Se trata de un área remota y despoblada de la alta cordillera andina, a elevaciones superiores a los 4.300 m s.n.m., pero con infraestructura de acceso en bastante buenas condiciones debido a la presencia de los géiseres de El Tatio, que son una atracción turística de nivel internacional.

El sistema geotérmico está caracterizado por una impresionante descarga de fluidos termales en superficie, la cual ocurre en el fondo y en la ladera oriental de un amplio valle de origen tectónico bordeado por una cadena de volcanes del Pleistoceno. Las manifestaciones termales de El Tatio incluyen géiseres, manantiales en ebullición, pozas de lodo, suelos humeantes y fumarolas, distribuidas en una superficie de aproximadamente 35 km² (Lahsen et al., 2005). La zona termal principal, que contiene los geiseres y una gran cantidad de manantiales termales que descargan aguas cloruradas, abarca una extensión de aproximadamente 2 km².

El Tatio ha sido uno de los primeros campos geotérmicos descubiertos en América Latina. Su historial cuenta con exploraciones ya en la década de 1920 y con una serie de pozos productores perforados exitosamente a principios de los años '70 y, más recientemente, en 2009. De hecho el campo geotérmico de El Tatio ha sido el protagonista de la escena geotérmica chilena, como ampliamente comentado en la anterior sección a la cual se hace referencia para los detalles históricos y los eventos que han llevado a la suspensión del proyecto en dos ocasiones, en 1982 y en 2009, cuando estaba encaminado a ser sede de la primera planta geotérmica de América del Sur.

Los resultados de varias fases de estudios de superficie y de la perforación de seis pozos de diámetro reducido y ocho pozos de diámetro comercial, que han alcanzado profundidades de hasta 2.000 m y registrado temperaturas mayores de 250°C, confirman la existencia de un importante recurso geotérmico. Según el modelo del recurso generado con los datos de las investigaciones más recientes, la zona perforada en proximidad de las manifestaciones de El Tatio corresponde a un sector marginal, de flujo lateral, de un sistema más amplio que se extiende hacia el sureste, en la zona denominada La Torta, con elevaciones superiores a los 5.000 m s.n.m. El recurso geotermal alcanzaría temperaturas superiores a los 270°C y se considera actualmente que tenga un potencial mayor que los 50-100 MWe inicialmente

⁷³ http://www.enap.cl/sala_prensa/noticias_detalle/general/982/enap-y-enel-green-power-inician-en-chile-la-construccion-de-la-primera-central-geotermica-de-sudamerica.
<http://www.enel.com/en-GB/media/news/egp-record-breaking-geothermal-in-south-america/p/090027d98258021>.
http://www.enel.com/en-GB/media/press_releases/enel-green-power-and-enap-begin-work-in-chile-on-the-first-geothermal-plant-in-south-america/t/1664099.
<http://piensageotermia.com/archives/27740>.

estimados para el sector conocido con perforaciones (Salgado y Raasch, 2002; Cummings et al., 2002; Lahsen et al., 2005). Según Morata (2014), con base en datos generados por el Consejo Geotérmico Chileno, el potencial del proyecto El Tatio estaría en el rango 100-250 MWe, sin embargo no indica la metodología utilizada para la estimación.

La empresa GDN controla el recurso mediante dos concesiones de explotación adyacentes, denominadas El Tatio y La Torta, y respectivamente otorgadas en 2006 y 2009. Sin embargo, el proyecto está suspendido indefinidamente.

Tinguiririca

El prospecto geotérmico de Tinguiririca se encuentra en los Andes Centrales de Chile, 150 km al sur de Santiago, sobre el flanco occidental del complejo volcánico homónimo, a elevaciones de 3.200-3.500 m s.n.m. (mapa 7). El valle cordillerano principal, adyacente al complejo volcánico de Tinguiririca, es accesible mediante un camino en modestas condiciones que lleva al pequeño pueblo y balneario termal de Termas del Flaco. En la zona hay algunas centrales hidroeléctricas, por lo cual existen también caminos de penetración en valles secundarios alrededor del complejo volcánico, así como cierta infraestructura de transmisión eléctrica. Sin embargo, el área de interés geotérmico se encuentra alejada de dichas infraestructuras existentes y requiere la construcción de por lo menos 15-20 km de nuevo camino, en parte sobre laderas con topografía muy accidentada. La zona, por su ubicación en la alta cordillera, se caracteriza también por intensas precipitaciones y acumulación de espesas capas de nieve durante la larga temporada invernal.

El complejo volcánico de Tinguiririca es de edad cuaternaria, se compone por varios edificios que se han formado a partir del Pleistoceno inferior, y ha estado activo en tiempos históricos con por lo menos una erupción en 1917⁷⁴. El flanco occidental del complejo volcánico se caracteriza por la presencia de manifestaciones termales (fumarolas, suelos humeantes y manantiales termales) dispersas en un sector de aproximadamente 40 km². Unos 16 km más al sur, en el fondo del valle adyacente al complejo volcánico, se encuentran los manantiales de Termas del Flaco, que descargan aguas cloruradas con temperatura de hasta 77°C (Clavero et al., 2011).

El sector de Tinguiririca fue identificado como zona de interés geotérmico a principio de los años '90, durante los primeros estudios de reconocimiento en la región central de Chile llevados a cabo por ENAP y CFG los cuales se limitaron a la evaluación preliminar de las manifestaciones de Termas del Flaco. El interés para explorar la zona surgió sucesivamente, en 2006-2007, cuando diferentes empresas solicitaron concesión de exploración y el proceso de licitación pública que siguió llevó a la subdivisión del área en dos bloques adyacentes, que fueron adjudicados a la empresa Energía Andina, S.A. en 2008.

Energía Andina procedió en 2009-2010 a explorar sistemáticamente el área mediante estudios geológicos geoquímicos y geofísicos, que llevaron al descubrimiento y caracterización de extensas manifestaciones termales en el flanco oeste del complejo volcánico de Tinguiririca. Los resultados obtenidos fueron prometedores y permitieron identificar un sector de interés prioritario en la parte alta del flanco suroeste del complejo volcánico, donde los indicadores geoquímicos y geofísicos llevaron a interpretar la presencia de un sistema geotérmico con temperaturas superiores a los 230°C (Clavero et al., 2011). Los resultados alentadores dieron paso, en el verano del 2011, a la perforación de un pozo diamantino de pequeño diámetro, el cual fue realizado con logística helitransportada en la parte alta de la falda del volcán, a elevación de 3.280 m s.n.m. El pozo alcanzó los 813 m de profundidad, registró una temperatura de 233°C y sostuvo un flujo de vapor durante algunas pruebas de descarga. Los aspectos geológicos del pozo han sido objeto de un estudio detallado, reportado en una tesis de graduación presentada en la Universidad de Chile (Droguett, 2012). Energía Andina reporta que el pozo comprobó la existencia de un sistema geotérmico activo, confirmando el modelo preliminar del recurso basado en los estudios de superficie (Clavero et al., 2011).

⁷⁴ <http://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=357030>.

Energía Andina solicitó sucesivamente una concesión de explotación, para continuar con actividades de perforación exploratoria profunda. La concesión, denominada Tinguiririca, fue otorgada en octubre del 2013. La empresa inició la construcción del camino de acceso al área de perforación, pero luego suspendió las actividades a mediados del 2014 y no resulta que haya habido ulteriores avances en el proyecto hasta la fecha.

La concesión de explotación Tinguiririca prevé el desarrollo de un proyecto de 80 MWe⁷⁵, sin embargo Energía Andina GDN no ha difundido información en cuanto al potencial global del recurso. Según Morata (2014), con base en datos generados por el Consejo Geotérmico Chileno, el potencial del proyecto estaría en el rango 90-200 MWe, pero no indica la metodología utilizada para la estimación.

Calabozo

Con el término Calabozo se hace referencia a un amplio sector de interés geotérmico ubicado en la Cordillera de los Andes, unos 250 km al sur de Santiago y 100 km al este de la ciudad de Talca (mapa 7). El área se extiende a lo largo del confín con Argentina, a elevaciones de 1.800-2.500 m s.n.m., en un sector remoto de la alta cordillera, muy alejado de la infraestructura vial existente. Los caminos de acceso más cercanos en los valles cordilleranos adyacentes terminan a 40-50 km de distancia, en sitios que son separados de la zona de interés geotérmico por territorios montañosos con morfología muy accidentada, lo cual implica serias dificultades para la construcción y mantenimiento de un camino de acceso al área. Mejores condiciones de acceso se dan por el lado argentino, donde la morfología es más favorable y existe un camino internacional estacional (que transita por Paso Vergara), que pasa una decena de km al norte de la zona de interés. El sector de Calabozos, por su ubicación en la alta cordillera, se caracteriza por intensas precipitaciones y acumulación de espesas capas de nieve durante la larga temporada invernal.

La zona geotérmica se extiende en un tramo de aproximadamente 25 km en un amplio valle comprendido entre el complejo volcánico activo de Peteroa-Azufre, al norte, y el Volcán Cerro del Medio, al sur, y que corresponde al borde de una amplia estructura volcano-tectónica conocida en literatura como Caldera de Calabozo. En dicha zona se encuentran varias manifestaciones termales, que incluyen aguas cloruradas en ebullición, agrupadas de norte a sur en las siguientes áreas principales: flanco oriental del Volcán Peteroa (fumarolas), Llolli (fumarolas y manantiales con temperatura de hasta 98°C), Pellejo (fumarolas y manantiales con temperatura de hasta 80°C), Poterillos y Calabozo (manantiales con temperatura de hasta 80°C).

El interés geotérmico del área de Calabozo surgió a mediados de los años '80 cuando investigaciones geológicas con fines científicos llevaron al descubrimiento de caudalosas fuentes termales, asociadas con volcanismo explosivo reciente (Caldera de Calabozo 0.8-0.15 Ma). Las evaluaciones preliminares efectuadas en ese entonces evidenciaron perspectivas para la existencia de un recurso geotérmico con temperatura mayor de 250°C (Salgado y Raasch, 2002; Lahsen et al., 2005).

Los primeros estudios dirigidos a la exploración geotérmica con fines comerciales fueron iniciados en Calabozo por ENAP en asociación con UNOCAL en 1999, y luego continuados por ENAP en 2002-2003 mediante la ejecución de investigaciones geológicas, geoquímicas y geofísicas (MT-TDEM). Estos estudios llevaron al descubrimiento de un mayor número de fuentes termales y fumarolas con respecto a las reportadas inicialmente, y permitieron confirmar el elevado interés geotérmico del área, con perspectivas para un recurso de gran extensión y temperatura en el rango 235-300°C (Salgado y Raasch, 2002; Lahsen et al., 2005).

La investigación continuó luego en 2005 cuando ENAP concretó la alianza con la empresa italiana ENEL a través de la empresa ENG la cual reanudó los trabajos de investigación en la concesión de exploración geotérmica Calabozo, que había sido otorgada a ENAP en 2002. ENG solicitó además dos concesiones adicionales (Calabozo II y Calabozo III) para ampliar el área de estudio hacia el norte abarcando el macizo del Volcán Peteroa y alcanzando una superficie total del área de estudio de 932 km².

⁷⁵ Diario Oficial de la República de Chile, Miércoles 13 de Noviembre del 2013. Disponible en: http://www.minenergia.cl/archivos_bajar/2013/D_92_13-11.pdf.

Se conoce que ENG efectuó ulteriores investigaciones geológicas, geoquímicas y geofísicas en la zona y que en 2009 perforó un pozo diamantino con logística helitransportada en el sector de Llulli; sin embargo, los resultados de las exploraciones no han sido publicados. Según Morata (2014), con base en datos generados por el Consejo Geotérmico Chileno, el potencial de la zona de Calabozo estaría en el rango 80-200 MWe, pero no indica la metodología utilizada para la estimación.

Actualmente el área de Calabozo sigue bajo el control del consorcio ENEL-ENAP, que sometió a nombre de GDN una solicitud de concesión de explotación denominada Calabozo, en la zona septentrional del área (sector Llulli-Pellejo), y una nueva solicitud de concesión de exploración en la zona meridional (sector Potrerillos- Calabozo), denominada Potrerillos, a nombre de ENG. Ambas solicitudes están en proceso en el Ministerio de Energía⁷⁶.

Pellado

En este documento se denomina “Pellado” a la zona geotérmica ubicada en el sector occidental de Laguna del Maule, en correspondencia del complejo volcánico Tátara-San Pedro-Pellado. El proyecto es también conocido en literatura como “Laguna del Maule”, por el nombre de la concesión de exploración inicialmente otorgada en la zona, y como “Mariposa” que es el nombre atribuido por la empresa Magma Energy Chile⁷⁷ que llevó a cabo las primeras exploraciones en el área.

El sitio se encuentra en los Andes Centrales de Chile, 280 km al sur de Santiago y 100 km al sureste de la ciudad de Talca (mapa 7), y se extiende sobre el flanco nororiental del Volcán Pellado, a elevaciones de 2.400-2.800 m s.n.m. Por su ubicación en la alta cordillera, el área se caracteriza por intensas precipitaciones y acumulación de espesas capas de nieve durante la larga temporada invernal.

La carretera internacional estacional de Paso Pehuenche, que conecta Talca con Malargüe, en Argentina, pasa por el valle del Río Maule al norte del complejo volcánico, por lo cual el área es de relativamente fácil acceso, y de hecho ya cuenta con un nuevo camino de aproximadamente 12 km, que conduce hasta el sector de interés geotérmico. En el Valle del Río Maule hay algunas centrales hidroeléctricas, así que en la zona existe también cierta infraestructura de transmisión eléctrica.

Las investigaciones geotérmicas en este sector de la cordillera iniciaron en 2003 cuando la Universidad de Chile obtuvo una concesión de exploración geotérmica denominada “Laguna del Maule” sobre un amplio sector en la cabecera del valle del Río Maule, alrededor de la laguna homónima. El interés geotérmico para este sector fue asociado con la presencia del extenso Complejo Volcánico Laguna del Maule, compuesto por más de cien centros eruptivos, con emisión de coladas, domos y flujos piroclásticos de composición dacítica y andesítica, con edad variable entre 1,4 Ma y reciente (post-glacial). El Departamento de Geología de La Universidad de Chile, bajo la dirección del Prof. A. Lahsen, inició el reconocimiento geotérmico del área mediante estudios geológicos de carácter regional y en 2007 llevó a cabo una prospección geoquímica mediante un convenio con la empresa ENG. Luego, en 2008, la Universidad de Chile cedió sus derechos de concesión a la empresa Magma Energy Chile, la cual completó la exploración superficial del área mediante estudios geológicos y geoquímicos adicionales y con la ejecución de un levantamiento MT-TDEM. Los resultados llevaron a seleccionar el sector del Volcán Pellado, ubicado al margen occidental del área de concesión, como área de mayor interés geotérmico. El proyecto fue en ese entonces renombrado “Mariposa” debido a la singular forma de la anomalía de resistividad encontrada (Hickson et al., 2011).

El complejo volcánico Tátara - San Pedro - Pellado es un edificio independiente del Complejo Volcánico Laguna Maule, que se formó durante los últimos 930.000 años mediante una compleja serie de eventos eruptivos explosivos y efusivos. En el flanco nororiental del Volcán Pellado se encuentran fumarolas y suelos humeantes en distintos sectores, denominados Los Hoyos, La Plata, Estero del Valle y Pellado, cuyas características geoquímicas indican una relación con un sistema geotérmico con temperatura más probable en el rango de 240-250°C (Hickson et al., 2011, Hodgson, 2013).

⁷⁶ http://antiguo.minenergia.cl/minwww/opencms/02_Noticias/otros/concesiones_geotermicas.html.

⁷⁷ Magma Energy Chile Ltda. Subsidiaria en Chile de la compañía canadiense Alterra Power Corp.

Magma Energy Chile concentró así su interés en la zona de “Mariposa”, donde perforó un primer pozo diamantino con logística helitransportada en 2009, y sucesivamente construyó un camino de acceso al sector para perforar dos pozos diamantinos adicionales en 2010, enfrentando serias dificultades ligadas a condiciones climáticas adversas y fuertes precipitaciones de nieve. Los pozos alcanzaron profundidades entre 660 y 911 m y encontraron una temperatura máxima de 205°C. Los resultados de todas las investigaciones efectuadas permitieron delinear una posible extensión del sistema geotérmico de 27 km², y determinar mediante método volumétrico-estadístico un potencial inferido del recurso de 320 MWe (Hickson et al., 2011, Hodgson, 2013).

Paralelamente a las perforaciones, la empresa solicitó una concesión de exploración adicional, denominada “Pellado”, para completar la exploración del recurso en su extensión hacia el oeste, afuera de la originaria concesión Laguna del Maule. Dicha concesión fue otorgada en 2010 y fue sucesivamente convertida en concesión de explotación en 2014. Igualmente en 2010, un sector al margen occidental de la originaria concesión de exploración Laguna del Maule fue convertido en concesión de explotación, así que actualmente el proyecto está basado en dos concesiones de explotación adyacentes (Laguna del Maule y Pellado) con una superficie total de 200 km²⁷⁸.

En 2013 Alterra Power Corp., la casa matriz de Magma Energy Chile, se asoció con la compañía filipina EDC, la cual adquirió el 70% de la empresa ENERCO creada para la gestión del proyecto Mariposa. EDC tomó el control de la ejecución del proyecto y planificó iniciar un programa de perforación exploratoria profunda dentro de finales del 2015⁷⁹. Sin embargo, en octubre del 2015 Alterra Power Corp., anunció que el socio EDC decidió postergar el inicio de las perforaciones hasta finales del 2016, debido a condiciones en el mercado de materias primas que han impactado negativamente en la economía del proyecto a corto plazo⁸⁰.

Chillán

El prospecto geotérmico de Chillán se encuentra en la Cordillera de los Andes, unos 390 km al sur de Santiago y 75 km al sureste de la ciudad homónima (mapa 7). La zona de interés geotérmico se extiende sobre el flanco meridional del complejo volcánico de los Nevados de Chillán, a elevaciones de 1.700-2.500 m s.n.m. Por su posición geográfica y elevación, el área se caracteriza por intensas precipitaciones y acumulación de espesas capas de nieve durante la larga temporada invernal.

La zona es fácilmente accesible desde la ciudad de Chillán mediante una carretera en parte pavimentada, que lleva al importante centro turístico de Termas de Chillán, con baños termales y canchas de esquí. Las instalaciones turísticas ocupan buena parte de la zona de interés geotérmico con condiciones morfológicas favorables. Por lo demás la morfología del área es bastante accidentada e implica ciertas limitaciones para la eventual instalación de infraestructuras de desarrollo geotérmico.

El área geotérmica de Chillán es conocida por la presencia de llamativas manifestaciones termales en forma de fumarolas sobrecalentadas, que alcanzan los 125°C, pozas de lodo y manantiales termales distribuidas en un amplio sector en el flanco suroeste del complejo volcánico activo de los Nevados de Chillán. Las manifestaciones termales se agrupan en dos áreas principales conocidas como Las Termas y Aguas Calientes.

Las investigaciones en el área remontan a finales de los años '70 cuando la Universidad de Chile realizó los primeros estudios geoquímicos de las manifestaciones termales con fines de investigación geotérmica (Lahsen, 1978). Luego, en 1993, el área fue seleccionada por ENAP y CFG para la realización de exploraciones más avanzadas, que incluyeron la ejecución de estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos (gravimetría y MT) y concluyeron en 1995 con la perforación de un pozo somero en la zona de las Termas de Chillán, en proximidad de la mayor manifestación termal presente en el área. La perforación interceptó zonas permeables someras y fue terminada a los 274 m de profundidad habiendo encontrado una

⁷⁸ http://antiguo.minenergia.cl/minwww/opencms/02_Noticias/otros/concesiones_geotermicas.html.

⁷⁹ <http://piensageotermia.com/archives/25008>.

⁸⁰ <http://www.alterrapower.ca/news/Press-Release/News-Releases/News-Releases-Details/2015/Alterra-Power-Announces-Rescheduling-of-Mariposa-Drilling-to-2016/default.aspx>.

temperatura de 198°C y un importante flujo de vapor, que originó una erupción descontrolada del pozo. El pozo fue controlado y sometido a algunas pruebas de producción que llevaron a estimar un caudal de vapor correspondiente a una capacidad de 2.4 MWe. El pozo fue luego clausurado en 1996 por razones de seguridad. Las interpretaciones geotermométricas indicaron la presencia de un reservorio somero con temperatura alrededor de los 200°C y un posible sistema más profundo cuya temperatura podría alcanzar los 270°C (Salgado y Raasch, 2002; Lahasen et al., 2005). Las investigaciones continuaron en la segunda mitad de los años '90 con la realización de estudios adicionales de geología y geoquímica por parte de ENAP en colaboración con UNOCAL, y a principios de los años 2000 con el apoyo de la Universidad de Chile, en el marco de un proyecto de investigación del FONDEF⁸¹.

En 2004 CFG-Chile⁸² obtuvo una concesión de exploración geotérmica en la zona de Chillán, la cual fue sucesivamente cedida en 2005 a la empresa ENG controlada por ENAP y la empresa italiana ENEL. ENG reanudó los trabajos de exploración efectuando ulteriores estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos, y perforó en 2009 un pozo diamantino con logística helitransportada en el borde occidental de la zona de Las Termas. Los resultados de las exploraciones de ENG no han sido publicados, así que no se cuenta con la información más avanzada en cuanto a las características y perspectivas de desarrollo de este sistema geotérmico.

Investigaciones independientes, recientemente realizadas por el Departamento de Geología de la Universidad de Chile mediante una tesis de graduación (Berríos, 2015), proporcionan información geoquímica detallada de las manifestaciones termales de Chillán, la cual lleva a la conclusión que los fluidos son de tipo vapor-calentados y no alcanzan equilibrio geoquímico en profundidad. Las estimaciones geotermométricas indican temperaturas máximas del sistema geotérmico alrededor de los 200°C.

Morata (2014), con base en datos generados por el Consejo Geotérmico Chileno, reporta para el prospecto geotérmico de Chillán un potencial en el rango 30-100 MWe, pero no indica la metodología utilizada para la estimación.

Actualmente el área de Chillán sigue bajo el control del consorcio ENEL-ENAP, el cual mediante la empresa ENG obtuvo en 2013 una concesión de explotación sobre el flanco suroeste del complejo volcánico de los Nevados de Chillán⁸³. No se conoce de actividades en curso o programas para el desarrollo comercial del recurso geotérmico.

Tolhuaca

El campo geotérmico de Tolhuaca se encuentra en Chile meridional, 550 km al sur de Santiago y 90 km al noreste de Temuco, en la zona limítrofe entre las regiones del Bío Bío y Araucanía (mapa 7). El área se extiende sobre el flanco noroccidental del Volcán Tolhuaca a elevaciones de 2.000-2.200 m s.n.m. Por su ubicación geográfica y elevación, el área se caracteriza por intensas precipitaciones y acumulación de espesas capas de nieve durante la larga temporada invernal.

El proyecto es también conocido como San Gregorio, por el nombre de la concesión geotérmica, o Curacautín, por el poblado más cercano, ubicado en la base de la ladera suroeste del Volcán Tolhuaca, desde el cual la empresa concesionaria ha construido un camino de acceso de 37 km para alcanzar el sector de interés geotérmico.

El Volcán Tolhuaca es un estrato-volcán inactivo, de edad cuaternaria, moderadamente erosionado por la acción glacial. Este es parte de un eje volcánico que incluye al volcán activo de Lonquimay, ubicado 10 km al sureste, y el alineamiento de Pemehue, constituido por una serie de conos y coladas basálticas, que se extiende por varios km sobre el flanco noroeste del Tolhuaca. Los flujos basálticos más recientes del alineamiento de Pemehue son de edad post-glacial. En el flanco noroeste del Tolhuaca, en un tramo de 2,5 km a lo largo del alineamiento de Pemehue, se encuentran

⁸¹ Proyecto FONDEF DI 1051; http://www.conicyt.cl/wpcontent/themes/fondef/encuentra_proyectos/proyecto/99/I/D9911051.html.

⁸² Sociedad compuesta por la compañía francesa CFG y ENAP.

⁸³ http://antiguo.minenergia.cl/minwww/opencms/02_Noticias/otros/concesiones_geotermicas.html.

varias fumarolas y manantiales vapor-calentados, asociados con amplias zonas de alteración hidrotermal (Melosh et al., 2012).

La investigación geotérmica en Tolhuaca inició en los primeros años 2000 cuando la empresa Geotermia del Pacífico (GDP) identificó el interés del área durante estudios de reconocimiento en el sur de Chile. A finales del 2004 GDP obtuvo una concesión de exploración geotérmica denominada San Gregorio, y en 2005 llevó a cabo un reconocimiento más avanzado que llevó al descubrimiento de dos importantes fumarolas en la parte alta del flanco noroeste del Volcán Tolhuaca, anteriormente desconocidas. Los datos geoquímicos obtenidos en ese entonces proporcionaron indicios favorables para la existencia de un recurso geotérmico con temperatura en el rango 220-250°C (Melosh, et al., 2009).

En 2008, la empresa GeoGlobal Energy Chile (GGE)⁸⁴ sucedió a GDP y tomó el control del proyecto⁸⁵ impulsando la ejecución de un programa intensivo de exploración. Durante la temporada de verano austral 2008-2009 GGE completó un programa de estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos (MT/AMT) y perforó un pozo diamantino con logística helitransportada. El pozo alcanzó la profundidad de 1.073 m atravesando un reservorio somero con vapor a 160°C y encontró una temperatura máxima de 289°C al fondo (Melosh et al., 2009). En el verano siguiente GGE perforó un segundo pozo de diámetro reducido con logística helitransportada, que alcanzó los 1.274 m y reconfirmó la existencia de un sistema geotérmico de alta temperatura.

En 2010 GGE Chile obtuvo una concesión de explotación en la zona, denominada San Gregorio, y en 2011 procedió con la construcción de un camino de acceso a la parte alta de la falda noroeste del Volcán Tolhuaca, para dar inicio a un programa de perforación exploratoria profunda con pozos de diámetro comercial. Dicho programa terminó en 2012 con la perforación de dos pozos de 2.300-2.500 m de profundidad, cuyos resultados confirmaron la presencia de un reservorio geotérmico comercialmente explotable, con temperatura superior a los 280°C. El último pozo en particular resultó con una significativa capacidad de producción de 12 MWe⁸⁶. La interpretación integrada de todos los datos obtenidos llevó a plantear un programa para el desarrollo de una planta geotérmica de 70 MWe (Mighty River Power, 2013). Según Morata (2014), con base en datos generados por el Consejo Geotérmico Chileno, el potencial del recurso en Tolhuaca estaría en el rango de 40-150 MWe, sin embargo no indica la metodología utilizada para la estimación.

En 2013 la empresa neozelandesa Mighty River Power, tras cinco años de participar como socio a través del fondo de inversiones que dio vida a GeoGlobal Energy, adquirió el control de GGE Chile y cambió su denominación a MRP GEOTERMIA Chile Ltda⁸⁷. MRP obtuvo permiso ambiental para el desarrollo del proyecto en 2013 y continuó con las actividades preparatorias para la instalación de una planta geotermoeléctrica de 70 MWe y su conexión al Sistema Interconectado Central (SIC) mediante la construcción de una línea de transmisión de 68 km.

El programa de MRP consideraba iniciar la perforación de pozos de producción en 2015 y poner en operación comercial la planta para el año 2019. Sin embargo, a finales del 2014 la empresa anunció públicamente su retiro del mercado internacional incluyendo de sus actividades en Chile⁸⁸, así que el proyecto se encuentra actualmente suspendido en fase de redefinición.

Cordón Caulle

El prospecto geotérmico de Cordón Caulle se encuentra en el sur de Chile, en el complejo volcánico de Puyehue, 800 km al sur de Santiago y 80 km al este de la ciudad de Osorno, (mapa 7). Se trata de un área remota, al interior del Parque Nacional Puyehue, sin caminos de acceso, que puede ser alcanzada solamente mediante senderos. Debido a su ubicación geográfica y elevación (1.400-1.600m s.n.m.), el área

⁸⁴ Subsidiaria de la empresa GeoGlobal Energy LLC, con sede central en Washington (USA).

⁸⁵ Sitio web de MRP Geotermia Chile Ltda. <http://geotermia.cl/nuestra-empresa/historia-de-la-compania/>.

⁸⁶ Sitio web de MRP Geotermia Chile Ltda. <http://geotermia.cl/proyecto/proyecto-greenfield-ii/>.

⁸⁷ Sitio web de MRP Geotermia Chile Ltda. <http://geotermia.cl/nuestra-empresa/historia-de-la-compania/>.

⁸⁸ http://www.nzherald.co.nz/business/news/article.cfm?c_id=3&objectid=11375267.

se caracteriza por intensas precipitaciones y acumulación de espesas capas de nieve durante la larga temporada invernal.

El Cordón Caulle es un graben volcánico-tectónico que se extiende entre el volcán activo de Puyehue, al sureste, y una amplia estructura caldérica más vieja y parcialmente erosionada, al noroeste (Cordillera Nevada). El complejo volcánico de Puyehue-Cordón Caulle se formó durante los últimos 0,25 Ma; la actividad inició con extensos flujos de lavas basálticas y sucesivamente evolucionó a un magmatismo félsico explosivo. La actividad más reciente en el Cordón Caulle está representada por erupciones fisurales post-glaciales e históricas con formación de una extensa capa de pómez, conos piroclásticos, lavas y lavas-domos de composición dacítica y riolítica. La depresión del Cordón Caulle contiene también varias manifestaciones termales, que se reparten en un área de 15 x 5 km y están principalmente asociadas con sus bordes noreste y sureste. En los sectores más elevados al sureste del área se encuentran fumarolas, manantiales termales, pozas de lodo en ebullición, y exhalaciones difusas de vapor y gas, mientras que en su extremidad noroeste, a elevación menor al interior de la caldera de Cordillera Nevada, se encuentra un importante grupo de manantiales termales con aguas bicarbonatadas en ebullición (localidad Trahuilco, caudal de aproximadamente 100 l/s), el cual es considerado ser la descarga de un importante acuífero geotermal contenido en el graben del Cordón Caulle (Lahsen et al., 2005, Sepúlveda et al., 2005).

La exploración geotérmica en Cordón Caulle empezó en 2003 por iniciativa de la Universidad de Chile, que obtuvo algunas concesiones de exploración sobre las laderas del complejo volcánico, denominadas Puyehue-Carran I, Puyehue-Carrán II y Carran - Los Venados. El Departamento de Geología de La Universidad de Chile, bajo la dirección del Prof. A. Lahsen, llevó a cabo estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos (gravimetría) a lo largo del Cordón Caulle, cuyos resultados fueron publicados en la tesis doctoral del investigador F. Sepúlveda (2006) y en algunas revistas y foros científicos (Sepúlveda et al., 2004; Sepúlveda et al., 2005; Sepúlveda et al., 2007). Sepúlveda y colaboradores identificaron condiciones muy favorables para la existencia de un importante recurso geotérmico, el cual sería compuesto por un acuífero somero calentado por vapor, con temperatura en el rango de los 150-170°C, y un subyacente sistema geotérmico de más alta temperatura con fase líquida en ebullición (Sepúlveda et al., 2007). El potencial del recurso, estimado por Sepúlveda (2006) mediante cálculos volumétrico-estadísticos del calor almacenado, sería significativo, probablemente alrededor de los 250 MWe.

En 2008, la Universidad de Chile cedió sus derechos de concesión a la empresa Magma Energy Chile, la cual abandonó el proyecto cuando las concesiones caducaron. A pesar de los resultados muy promisorios de las exploraciones efectuadas por la Universidad de Chile, y de perfilarse como un recurso con importantes perspectivas de desarrollo (posiblemente con el mayor potencial en el sur de Chile), el proyecto Cordón Caulle no ha recibido interés y se encuentra actualmente abandonado. Esto se debe principalmente al hecho de que toda la zona geotérmica se encuentra al interior del Parque Nacional Puyehue, lo cual implica fuertes restricciones para la realización de actividades de exploración y desarrollo geotérmico.

4. Potencial geotermo-eléctrico

Existen diferentes evaluaciones del potencial geotérmico de Chile, basadas en distintos criterios y niveles de información, pero todas de carácter preliminar y muy aproximado. De hecho, hace falta una evaluación integral y actualizada del potencial geotérmico a nivel nacional.

En 1986 Lahsen publicó un estudio en el cual estimó el potencial geotermo-eléctrico de Chile en aproximadamente 16.000 MWe durante 50 años. Dicho resultado está basado en estimaciones de calor almacenado con base en datos de flujo de calor, y se refiere a la extracción de energía desde fluidos con temperatura mayor de 150°C, contenidos en el subsuelo a profundidades menores de 3 km, considerando un factor de recuperación de 8% (Lahsen, 1986).

Sucesivamente, Gawell et al. (1999) reportaron una estimación más conservativa, con un potencial variable entre 780 y 1.630 MWe, que podría aumentar hasta los 2.350 MWe en condiciones

de desarrollo tecnológico más avanzado, pero sin proporcionar información en cuanto a la metodología aplicada.

Evaluaciones recientes, basadas en el conocimiento un poco más avanzado del recurso geotérmico en el país, consideran la sumatoria de estimaciones preliminares de potencial en los principales proyectos geotérmicos que están actualmente en fase de exploración, proponiendo un potencial variable entre 1.000 y 2.440 MWe, para los proyectos mejor conocidos, y que pudiera alcanzar los 3.500 MWe incluyendo a proyectos menos explorados (Morata, 2014, con base en datos del Consejo Geotérmico de Chile). De forma similar Lahsen (2015) calculó un potencial global variable entre 400 y 1.000 MWe para los proyectos geotérmicos más avanzados en el norte de Chile y de entre 650 y 950 MWe para los proyectos en condiciones similares en el centro-sur de Chile, por un total variable entre 1.050 y 2.950 MWe.

5. Situación actual y perspectivas de desarrollo

Durante la última década el sector geotérmico en Chile ha experimentado una intensa actividad, con fuerte demanda de concesiones por parte de varias compañías nacionales y extranjeras, que se han dedicado a explorar numerosas áreas en diferentes regiones del país. Actualmente, existen 45 concesiones de exploración y 9 concesiones de explotación vigentes, más 24 solicitudes de explotación y 33 de exploración en proceso⁸⁹.

Entre las compañías involucradas, además de la empresa estatal ENAP, que ha jugado un importante papel catalizador en el sector, se encuentran reconocidos desarrolladores geotérmicos y empresas energéticas de calibre internacional como son: Alterra Power Corp., Enel Green Power, Energy Development Corporation, Migthy River Power, Origin Energy y Ormat, entre otras.

Sin embargo, los resultados no satisfacen las expectativas, dado que hasta la fecha se han consolidado en todo Chile solamente dos proyectos con perspectivas concretas de desarrollo comercial (Apacheta y Tolhuca), y otro par (Tinguiririca y Pellado) que cuentan con resultados que justifican pasar a la fase de perforación exploratoria profunda. Por otro lado, el proyecto más avanzado, históricamente más emblemático y prometedor de Chile (El Tatio) ha sido suspendido indefinidamente.

De hecho, en los últimos años, a partir del 2012-2013, el dinamismo del sector ha mostrado señas de estancamiento, debido a la acumulación de experiencias que han puesto en evidencia las dificultades técnicas, logísticas, socio-ambientales, administrativas, financieras y de mercado, que condicionan el desarrollo de la geotermia en el país. Las actividades de exploración se volvieron en general menos intensas, las empresas geotérmicas redujeron sustancialmente sus programas, y en algunos casos los suspendieron. Los proyectos más avanzados, que estaban anunciados para pasar al desarrollo comercial (Apacheta y Tolhuca en particular) han tenido retrasos sustanciales en sus programas.

Entre los principales actores, Energía Andina suspendió sus actividades a mediados de 2014 y sucesivamente su socio Origin Energy anunció en septiembre 2015 su retiro del sector geotérmico⁹⁰; MRP a finales del 2014 anunció el retiro de sus operaciones internacionales⁹¹, lo cual implicó la suspensión del proyecto Tolhuca, que estaba encaminado hacia la puesta en operación de una planta geotermo-eléctrica en 2019; mientras que EDC anunció recientemente la suspensión temporal, hasta finales del 2016, de sus programas de perforación exploratoria en el proyecto Mariposa (Pellado)⁹². Actualmente, tanto Energía Andina como MRP, están clausurando los pozos perforados para dar

⁸⁹ http://antiguo.minenergia.cl/minwww/opencms/02_Noticias/otros/concesiones_geotermicas.html.

⁹⁰ <http://www.thinkgeoenergy.com/origin-energy-exits-all-geothermal-activities-and-assets/>.

⁹¹ http://www.nzherald.co.nz/business/news/article.cfm?c_id=3&objectid=11375267.

⁹² <http://www.alterrapower.ca/news/Press-Release/News-Releases/News-Releases-Details/2015/Alterra-Power-Announces-Rescheduling-of-Mariposa-Drilling-to-2016/default.aspx>.

cierre definitivo a sus actividades en Chile, mientras que EDC habría encargado un análisis de las perspectivas reales de desarrollo geotérmico en el país, para tomar una decisión al respecto⁹³.

El único proyecto sobre el cual se concentran las esperanzas de la geotermia en Chile queda Cerro Pabellón (Apacheta), donde el 14 de Julio de 2015 GDN dio oficialmente inicio a la construcción de una central geotérmica de 48 MWe, la cual entraría en operación en dos etapas sucesivas de 24 MWe, respectivamente en el primer trimestre del 2017 y en 2018⁹⁴. Ésta sería la primera planta geotérmica de Chile y muy probablemente también la primera en toda América del Sur.

Las dificultades que enfrenta el sector han llamado la atención del Gobierno y de organismos internacionales, que en los últimos tiempos han iniciado a tomar acciones para hacer frente a la situación. El Gobierno de Chile está trabajando en la revisión de la legislación geotérmica, para perfeccionar diferentes aspectos de carácter legal y administrativo. El BID ha dado inicio en 2014 a un programa para mitigación del riesgo geotérmico en Chile (denominado MiRiG⁹⁵), con el objetivo de apoyar inicialmente a por lo menos dos proyectos para que superen la fase de perforación de alto riesgo. El Banco Mundial está apoyando al Ministerio de Energía con un programa de asistencia técnica para mejorar el marco normativo y fortalecer las capacidades de gestión para la movilización de las inversiones en energía geotérmica, así como mejorar las condiciones de mercado para promover el desarrollo sostenible del sector⁹⁶. La KfW de Alemania, en colaboración con otros organismos multilaterales, ha lanzado a finales del 2014 otro fondo, denominado “Geothermal Development Fund” (GDF) para América Latina, enfocado en a la mitigación de riesgos en las fases iniciales de perforación exploratoria, el cual estará disponible también para Chile y entraría en operación en 2016⁹⁷.

Las perspectivas de desarrollo para el sector geotermo-eléctrico en Chile no están por lo tanto muy claras en este momento, y mucho dependerán del éxito que puedan tener las iniciativas de mejora del marco legal y promoción del sector que está llevando el Gobierno, así como de la implementación de los diferentes fondos de mitigación de riesgo. El éxito del único proyecto actualmente encaminado hacia la instalación de una planta geotérmica (Cerro Pabellón, en Apacheta) será también un elemento que puede jugar un fuerte papel catalizador en el sector, por su valor demostrativo y por la consolidación de experiencia en cuanto a las dificultades y costos de una planta geotérmica en las típicas condiciones del territorio alto-andino de Chile.

D. Colombia

1. Reseña histórica de la investigación geotérmica

Los primeros estudios del recurso geotérmico en Colombia remontan al 1968, cuando la empresa Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC) encargó al Ente Nacional de Electricidad de Italia (ENEL) una evaluación de las perspectivas de desarrollo geotérmico para generación de energía en el complejo volcánico del Nevado del Ruiz. El estudio evaluó los rasgos geotermales en un área de 1.500 km², determinó algunas zonas promisorias y recomendó continuar la exploración con estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos. Sin embargo, las investigaciones no continuaron en ese entonces, sino

⁹³ <http://www.revistaei.cl/2016/03/21/bajo-precio-de-la-energia-sigue-cobrando-victimas-cierran-empresas-de-geotermia/#>.

⁹⁴ http://www.enap.cl/sala_prensa/noticias_detalle/general/982/enap-y-enel-green-power-inician-en-chile-la-construccion-de-la-primera-central-geotermica-de-sudamerica.
<http://www.enel.com/en-GB/media/news/egp-record-breaking-geothermal-in-south-america/p/090027d98258021a>.
http://www.enel.com/en-GB/media/press_releases/enel-green-power-and-enap-begin-work-in-chile-on-the-first-geothermal-plant-in-south-america/t/1664099.
<http://piensageotermia.com/archives/27740>.

⁹⁵ El programa MiRiG, basado en fondos del Clean Technology Fund (CTF), ha sido diseñado y está siendo implementado por el BID en consultación con el Ministerio de energía de Chile.

⁹⁶ <http://documents.worldbank.org/curated/en/2015/09/25096256/chile-technical-assistance-geothermaldevelopment-project>.

⁹⁷ http://www.ndf.fi/sites/ndf.fi/files/gdf_launch_press_notification_0481214.pdf.

fueron retomadas quince años después por la misma CHEC, cuando en 1983 completó un estudio de pre-factibilidad sobre todo el complejo volcánico del Nevado del Ruiz, y seleccionó tres áreas (Nereidas, Laguna de Otún y Volcán Machín) prioritarias para la perforación exploratoria (Battocletti et al., 1999; Alfaro et al., 2000).

Durante los años '70 el Instituto Colombiano de Energía Eléctrica (ICEL) efectuó investigaciones geotérmicas en todo el territorio nacional e inició a identificar áreas de interés para la generación geotermo-eléctrica. A principios de los años '80 las investigaciones continuaron en el marco de una iniciativa promovida por OLADE para realizar estudios de reconocimiento geotérmico en la cordillera volcánica de Colombia y Ecuador. Dichos estudios fueron efectuados en diferentes etapas entre 1979 y 1982 por las empresas consultoras italianas Aquater y Geotérmica Italiana y por el BRGM de Francia. En cuanto a Colombia, dichos estudios excluyeron a la zona del Nevado del Ruiz, que ya estaba siendo investigada por CHEC, y fueron enfocados en la evaluación de nuevas áreas mediante investigaciones geológicas y geoquímicas de carácter regional. Los resultados permitieron identificar y clasificar nueve áreas de interés; las zonas volcánicas de Chiles - Cerro Negro y Azufral fueron clasificadas de alta prioridad, las zonas de Paipa e Iza con prioridad medio-alta, los volcanes Cumbal y Galeras de prioridad media, y las áreas de los volcanes Sotará, Puracé, Doña Juana y Nevados de Huila de baja prioridad (Monsalve et al., 1998; Battocletti et al., 1999; Alfaro et al., 2000; Mejía et al., 2014).

Después del estudio de reconocimiento nacional, en los años '80 las actividades fueron enfocadas en el área geotérmica prioritaria denominada Tufiño - Chiles - Cerro Negro, ubicada en la frontera entre Ecuador y Colombia, en la cual fue realizado un estudio de pre-factibilidad amparado en un acuerdo establecido en 1982 entre ambos países. OLADE continuó promoviendo las actividades en colaboración con las instituciones nacionales ICEL (Colombia) e INECEL (Ecuador) y canalizando ayuda financiera del Gobierno de Italia. El estudio de pre-factibilidad fue completado en 1987 con un informe realizado por la firma consultora italiana Aquater (Alfaro et al., 2000; CEPAL, 2000).

En los años '90 el interés volvió nuevamente al área del Nevado del Ruiz, donde CHEC había completado un estudio de pre-factibilidad en 1983 identificando tres sectores de interés prioritario. En 1992 CHEC efectuó estudios adicionales con la empresa consultora mexicana Geocónsul, y en 1997, mediante la empresa subsidiaria Geoenergía Andina S.A. (GESA), perforó el primer pozo geotérmico de Colombia, en el sector de Nereidas. El pozo alcanzó una profundidad de 1.466 m y encontró aproximadamente 200°C, pero sin permeabilidad, por lo cual el proyecto fue sucesivamente suspendido (Monsalve et al., 1998; Mejía et al., 2014).

A partir de 1997 el Gobierno encargó a INGEOMINAS (sucesivamente Servicio Geológico Colombiano - SGC, a partir de 2011) la realización de investigaciones geotérmicas en el país, el cual se volvió en la única entidad involucrada en el sector durante más de una década, hasta que en 2008-2010 volvió a surgir el interés de algunas empresas para el desarrollo de proyectos geotérmicos. Desde finales de los años '90 el servicio geológico se dedicó activamente a incrementar el conocimiento del recurso geotérmico en Colombia, trabajando tanto a nivel regional, con la preparación de mapas e inventarios de fuentes termales y de un mapa geotérmico nacional, como a nivel de proyectos específicos, con la realización de estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos en varias de las áreas de mayor interés que habían sido identificadas por el estudio de reconocimiento geotérmico nacional de 1982. Las principales contribuciones se dieron en los prospectos del Volcán Azufral, Paipa, en todo el sector del macizo volcánico del Ruiz, y también con el reciente descubrimiento de una nueva área promisoría, denominada San Diego (Mejía et al., 2014; Alfaro et al., 2000; Alfaro et al., 2005; Alfaro, 2015).

En años recientes las empresas eléctricas nacionales ISAGEN y EPM han iniciado a involucrarse en el sector geotérmico, así como ha surgido cierto interés también por parte de la empresa petrolera nacional ECOPETROL. La empresa EPM, mediante su subsidiaria CHEC, retomó las actividades en el Volcán Ruíz, que habían sido suspendidas en 1997 después de la perforación del pozo en Nereidas. En 2009 CHEC-EPM inició nuevos estudios en el área mediante la contratación de una compañía especializada en exploración geotérmica. ISAGEN se interesó en el proyecto Tufiño - Chiles - Cerro Negro y en la zona del Volcán Ruiz; en 2008 firmó un acuerdo de cooperación con el Servicio Geológico Colombiano y sucesivamente gestionó colaboración técnica y financiera con otras

instituciones nacionales (COLCIENCIAS, CIF, UPME, Universidad Nacional de Colombia) e internacionales (USTDA, BID, JCF, GEF). En los últimos 5 años ISAGEN ha llevado a cabo exploraciones en la zona del Volcán Ruiz, donde perforó tres pozos de gradiente, llegó a definir un modelo conceptual del sistema geotérmico y está preparando la perforación de pozos exploratorios para la confirmación del recurso. En el proyecto Tufiño - Chiles - Cerro Negro ISAGEN ha sido delegada por el Ministerio de Energía de Colombia para trabajar en colaboración con la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC EP), a raíz de un acuerdo binacional firmado en 2010 entre los Gobiernos de Ecuador y Colombia para el desarrollo conjunto del proyecto. ISAGEN y CELEC EP han firmado un acuerdo en 2012 para realizar un nuevo estudio de pre-factibilidad en Tufiño - Chiles - Cerro Negro mediante la contratación de una compañía especializada en exploración geotérmica. ECOPEL por su parte está desarrollando iniciativas para reducir la dependencia de las fuentes convencionales de energía, dentro de las cuales está considerando la realización de proyectos geotérmicos de baja entalpía a partir de 2016 (Mejía et al., 2014; Alfaro, 2015).

2. Marco legal

Colombia no cuenta con una legislación específica para el sector geotérmico. De hecho, no hay una ley para el otorgamiento y administración de concesiones geotérmicas, ni otras normas que definan un marco regulatorio claro para la exploración y desarrollo del recurso geotérmico. Existe sin embargo un marco jurídico para las energías renovables no convencionales que contempla a los recursos geotérmicos y su explotación para fines energéticos. Los principales instrumentos legales pertinentes al sector geotérmico se describen a continuación.

En Colombia los recursos naturales renovables son regulados por el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección del Medio Ambiente⁹⁸, el cual define a los recursos geotérmicos como: “combinación natural del agua con una fuente calórica endógena subterránea cuyo resultado es la producción espontánea de aguas calientes o de vapores” y también las “fuentes calóricas endógenas subterráneas a las cuales sea posible inyectar agua para producir su calentamiento, o para generar vapor”. El Código define además como recursos geotérmicos a los fluidos termales “que afloran naturalmente o por obra humana con temperatura superior a 80 grados centígrados o a la que la ley fije como límite en casos especiales”, mientras que las fuentes termales con temperatura inferior son consideradas “aguas termales”. El Código establece que la Nación se reserva el dominio de los recursos geotérmicos, considerando como posibles usos la producción de energía, la producción de calor directo para fines industriales o de refrigeración o calefacción, la producción de agua dulce, y la extracción de su contenido mineral, entre otros. El uso de los recursos naturales renovables puede ser otorgado en concesión bajo condiciones específicas establecidas en el Código. En el caso de la geotermia, la concesión del recurso implica también la concesión de uso de aguas para explotar la fuente geotérmica.

Otro instrumento legal pertinente a la geotermia es la Ley de Fomento del Uso Racional y Eficiente de la Energía (URE)⁹⁹, la cual refuerza el estatus del recurso geotérmico como recurso renovable y lo define como “energía que puede obtenerse del calor del subsuelo terrestre”. Dicha Ley asigna al Ministerio de Minas y Energía, la responsabilidad de promover, organizar y garantizar el desarrollo de las fuentes alternativas de energía mediante la formulación de un Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás Formas de Energía No Convencionales (PROURE), el cual cuenta actualmente con un plan de acción indicativo¹⁰⁰ que incluye a la promoción del uso de fuentes no convencionales de energía entre varias acciones para el fortalecimiento del sector. En este

⁹⁸ Decreto Ley 2811 de 1974. Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Bogotá. Disponible en: <http://biblovirtual.minambiente.gov.co:3000/DOCS/MEMORIA/MADS-0026/MADS-0026.pdf>.

⁹⁹ Ley 697 de 2001. Fomento del Uso Racional y Eficiente de la Energía. Disponible en: <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Conoce/ley697.pdf>.

¹⁰⁰ Resolución 18-0919 de 2010. Adopción del Plan de Acción Indicativo 2010-2015 para desarrollar el Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás formas de Energía No Convencionales, PROURE. Bogotá. Disponible en: https://www.minminas.gov.co/documents/10180/558752/Informe_Final_Consultoria_Plan_94751307de_accion_Proure.pdf/e8cdf796-d7b1-4bb1-90b9-e756c7f48347.

contexto la Unidad de Planificación Minera y Energética (UPME)¹⁰¹ estableció en 2010 un Plan de Desarrollo para las Fuentes no Convencionales de Energía en Colombia (PDFNCE)¹⁰² el cual, para la geotermia, estableció las metas de completar estudios de pre-factibilidad en áreas geotérmicas prioritarias (Volcán Azufral, Tufiño-Chiles-Cerro Negro y Paipa-Iza), y de llevar a cabo un estudio sobre las regulaciones necesarias para la explotación de los recursos geotérmicos.

Recientemente, el Gobierno de Colombia ha reforzado el marco legal para el desarrollo de fuentes no convencionales de energía, aprobando en 2013 el Estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA)¹⁰³ y promulgando en 2014 una nueva ley que regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético (Ley 1715)¹⁰⁴. Esta Ley establece incentivos fiscales para fomentar la investigación, el desarrollo y la inversión en el sector de las fuentes no convencionales de energía (nuclear, biomasa, pequeñas hidroeléctricas, eólica, geotérmica, solar y mareomotriz). Los incentivos prevén la deducción desde la renta anual del 50% de las inversiones realizadas durante 5 años; la exoneración del IVA sobre equipos, elementos, maquinaria y servicios nacionales o importados que se destinen a la pre-inversión e inversión; incentivos arancelarios y depreciación acelerada de activos. Con referencia específica a la geotermia, la Ley 1715 del 2014 establece las siguientes líneas de acción:

- Encarga a la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG)¹⁰⁵ la realización de estudios para definir una reglamentación técnica del sector geotérmico.
- Promueve la evaluación del potencial de la geotermia por parte del Gobierno, poniendo en marcha instrumentos para incentivar la investigación y exploración del recurso geotérmico y fomentar su aprovechamiento de alta, baja y muy baja temperatura.
- Responsabiliza al Ministerio de Minas y Energía para la definición de las condiciones de participación de la energía geotérmica en el mercado energético nacional, estableciendo los requerimientos técnicos y de calidad a cumplir por las instalaciones que utilicen el recurso geotérmico como fuente de generación.
- Responsabiliza al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, para que determine los requerimientos ambientales para los proyectos desarrollados con energía geotérmica.

Estas acciones están sentando pasos fundamentales para mejorar el marco normativo y promover el desarrollo del sector geotérmico en Colombia.

3. Principales proyectos geotérmicos

Colombia cuenta con un nivel bastante avanzado de identificación de su recurso geotermal. El estudio de reconocimiento geotérmico nacional efectuado a principios de los años '80 y la continua dedicación a la investigación geotérmica del servicio geológico nacional durante los últimos veinte años han llevado a disponer de un inventario de manifestaciones termales y de un mapa geotérmico con interpretación de la temperatura a 3 km de profundidad en todo el territorio nacional (Alfaro, 2015).

El Servicio Geológico Colombiano ha recientemente desarrollado una aplicación en internet que lleva a la accesibilidad del público toda la información disponible sobre manifestaciones termales en el país, con herramientas automáticas de búsqueda, clasificación y procesamiento de datos geoquímicos¹⁰⁶. El inventario incluye datos de 300 fuentes termales y 11 fumarolas, en su mayoría localizadas en la región andina y asociadas con volcanes cuaternarios (Alfaro et al., 2015).

¹⁰¹ UPME - Unidad administrativa especial del orden nacional, adscrita al Ministerio de Minas y Energía.

¹⁰² Documento disponible en: http://www.upme.gov.co/Sigic/DocumentosF/Vol_1_Plan_Desarrollo.pdf.

¹⁰³ Ley 1665 de 2013. Aprobación del “Estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA)”. Disponible en: <http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Leyes/Documents/2013/LEY%201665%20DEL%2016%20DE%20JULIO%20DE%202013.pdf>.

¹⁰⁴ Ley 1715 de 2014. Regulación de la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. Disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=57353>.

¹⁰⁵ CREG - Entidad adscrita al Ministerio de Minas y Energía.

¹⁰⁶ <http://hidrotermales.sgc.gov.co/>.

Según reportado por Mejía et al. (2014) y Alfaro (2015), hasta la fecha han sido identificadas unas diez zonas promisorias para desarrollo geotermo-eléctrico, algunas de las cuales incluyen a varios sectores que constituyen muy probablemente prospectos independientes. Todas estas zonas se encuentran en la cordillera andina. En la Cordillera Central se conoce históricamente al sector Cerro Bravo - Cerro Machín, que incluye a varias áreas geotérmicas relacionados con los volcanes Cerro Bravo, Nevado del Ruiz, Santa Isabel, Paramillo de Santa Rosa, Nevado del Tolima y Cerro Machín. Esta sigue siendo una de las zonas geotérmicas más conocidas y estudiadas de Colombia. Adicionalmente la Cordillera Central incluye a las zonas del Nevado del Huila, de la cadena volcánica Coconucos que incluye como sistema principal al Volcán Puracé, del Volcán Doña Juana, del Volcán Galeras, y la recién descubierta zona de San Diego. En el suroeste del país, a lo largo de la Cordillera Occidental, las zonas de mayor interés están asociadas con los volcanes Azufra, Cumbal y Chiles - Cerro Negro. Este último sistema, también conocido como Tufiño-Chiles-Cerro Negro, se desarrolla en el sector fronterizo entre Colombia y Ecuador y constituye un proyecto compartido entre los dos países. En la Cordillera Oriental se encuentra la zona de Paipa-Iza, asociada con volcanismo menos reciente (Plioceno-Pleistoceno Inferior).

Otras manifestaciones termales, ubicadas en las regiones del Caribe y del Pacífico, así como en la zona de borde entre la Cordillera Oriental y las cuencas del Orinoco y Amazonas indican la presencia de sistemas geotérmicos, presumiblemente de baja temperatura, también en sectores alejados de la cordillera volcánica cuaternaria, donde el termalismo está muy probablemente asociado con circulación profunda a lo largo de importantes estructuras tectónicas. Adicionalmente es importante mencionar que cierto potencial existe también en algunas cuencas sedimentarias, como las de Los Llanos, Caguán-Putumayo y Magdalena que se caracterizan por elevados gradientes geotérmicos (Mejía et al., 2014; Alfaro, 2015).

La mayoría de las áreas geotérmicas promisorias están sin embargo identificadas con base en datos geoquímicos y geo-vulcanológicos, que no proporcionan un marco determinante en cuanto a la efectiva existencia de recursos aptos para uso geotermo-eléctrico comercial. Con base en la información disponible en literatura se identifican por lo menos cuatro áreas geotérmicas cuyas características son claramente promisorias para el desarrollo geotermo-eléctrico y, de hecho cuentan con investigaciones un poco más avanzadas, a nivel de pre-factibilidad. Se trata de las áreas indicadas en el cuadro 5 y ubicadas en el mapa 8. Las características y estado actual de investigación de dichas áreas se resumen a continuación.

Tufiño - Chiles - Cerro Negro

Este prospecto geotérmico se encuentra entre Colombia (Departamento de Nariño) y Ecuador (Provincia del Carchi), alrededor de los volcanes Chiles y Cerro Negro de Mayasquer, 35 km al oeste de la ciudad ecuatoriana de Tulcán, en proximidad de los centros poblados fronterizos de Tufiño (Ecuador) y Chiles (Colombia). La línea fronteriza colombo-ecuatoriana divide al área de interés geotérmico, que pertenece así a la zona de integración entre Colombia y Ecuador, y goza de beneficios establecidos por los dos países en el marco de las Comisiones de Vecindad con el objeto de impulsar el desarrollo socio-económico de la zona fronteriza (CEPAL, 2000).

Cuadro 5
Áreas geotérmicas con perspectivas de desarrollo eléctrico de Colombia

Provincia Geológica	Región administrativa	Área geotérmica	Nivel de estudio	Temperatura estimada / medida (°C)	Potencial reportado (MWe)
	Nariño/Carchi	Tufiño ^a	Exploración superficie	230	138
Cordillera occidental	Nariño	Volcán Azufra	Exploración superficie	220-240	n.d.
Cordillera central	Caldas	Nevado del Ruiz	Perforación Exploración	250-260	100
Cordillera oriental	Boyacá	Paipa	Exploración superficie	175-230	n.d.

Fuente: Elaboración propia.

^a Proyecto binacional colombo-ecuatoriano.

El área se desarrolla a elevaciones de 3.800-4.200 m s.n.m. y se caracteriza por un clima frío y lluvioso que se mantiene constante a lo largo de todo el año. El poblado de Tufiño está conectado

por una carretera de primer orden con los principales centros poblados aledaños, tanto del lado colombiano como ecuatoriano, por lo tanto el área goza de buenas condiciones de acceso, también mediante un camino secundario que desde Tufiño se adentra en las laderas del Volcán Chiles, cruzando el sector de mayor interés geotérmico. La línea de interconexión eléctrica en 220 kV entre Colombia y Ecuador pasa unos 25 km al este del área geotérmica, mientras que las redes de transmisión en 138 kV de Ecuador y Colombia se encuentran a unos 15-20 km de distancia.

Mapa 8
Ubicación de los principales proyectos con perspectivas de desarrollo geotermo-eléctrico en Colombia



Fuente: Mapa base tomado de <http://www.ezilon.com/maps/south-america/columbia-road-maps.html>.

Nota: Los límites y los nombres que figuran en este mapa no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

El Volcán Chiles, es un edificio de modestas dimensiones, de composición andesítica y dacítica, con actividad en el Pleistoceno tardío, mientras que el Cerro Negro de Mayasquer, adyacente al Chiles, es un volcán activo de composición dacítica. El área alrededor del Volcán Chiles presenta varias zonas de alteración hidrotermal y manifestaciones termales. La manifestaciones principales se encuentran en la parte superior de la ladera oriental del volcán, en el sector de Aguas Hediondas, y son constituidas por manantiales ácidos con temperatura máxima de 55°C, mientras que fuentes termales bicarbonatadas son comunes a elevaciones menores al oriente del volcán, en proximidad de los centros poblados de Tufiño y Chiles (Beate et al., 2015).

El área fue descubierta por el INECEL de Ecuador en 1978, durante las primeras actividades de reconocimiento geotérmico en territorio colombiano, que identificaron varias fuentes termales asociadas con dos aparatos volcánicos de edad reciente. Luego, en 1979, los estudios de reconocimiento geotérmico nacional en Ecuador, realizados por recomendaron la ejecución la empresa Aquater de Italia y el BRGM de Francia por cuenta de OLADE e INECEL, confirmaron condiciones favorables para la existencia de un sistema geotérmico de interés comercial, y de un programa de investigaciones

geológicas y geoquímicas que fue denominado "I Fase del Estudio de Prefactibilidad". La firma consultora Geotermica Italiana efectuó dichas investigaciones en 1981 por cuenta de INECEL y OLADE. Al mismo tiempo el estudio de reconocimiento geotérmico nacional en Colombia, realizado por OLADE e ICEL, también clasificó al área de los volcanes Chiles y Cerro Negro, como una zona de interés prioritario para la exploración geotérmica, por lo cual los gobiernos de ambos países decidieron desarrollar una exploración conjunta y suscribieron un acuerdo en marzo de 1982 que marcó el inicio del "Proyecto Geotérmico Binacional Tufiño-Chiles-Cerro Negro" (CEPAL, 2000).

Después de algunos estudios geo-vulcanológicos adicionales llevados a cabo por OLADE en 1983 y un programa de investigaciones geológicas y geoquímicas implementado por ICEL en el lado colombiano, para homogeneizar el nivel de información en toda el área, a ambos lados de la frontera, el proyecto obtuvo a través de OLADE el apoyo financiero del Gobierno de Italia para la realización de un estudio de pre-factibilidad. El estudio fue coordinado por OLADE conjuntamente con ICEL e INECEL y fue realizado entre 1986 y 1987 por la firma consultora italiana Aquater. Los resultados, basados en estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos (SEV y MT) llevaron a la interpretación de un sistema geotérmico constituido por dos posibles horizontes productores: uno profundo (>1500 m) con temperatura superior a los 200°C (230°C según geotermometría de gases), y uno más somero (500-1000 m) con temperatura de aproximadamente 150°C. En ese entonces fue planteado un proyecto de desarrollo en el rango de 15-30 MWe. La significativa extensión del área con manifestaciones y alteraciones termales sugiere sin embargo la presencia de un recurso de mayor tamaño. De hecho, Almeida (1990 - reportado en Beate et al., 2015), con base en método volumétrico de calor almacenado, estimó el potencial del recurso en 138 MWe (CEPAL, 2000; Beate et al., 2015).

A pesar de los resultados prometedores obtenidos del estudio de pre-factibilidad a finales de los años '80, el proyecto no continuó y no hay reporte de mayor actividad durante los veinte años siguientes, con excepción de un levantamiento MT complementario efectuado en el lado ecuatoriano en 1994 por entidades privadas (Tecniseguros - ODIN Mining)¹⁰⁷, y de un estudio de actualización y evaluación del entorno del proyecto efectuado por CEPAL en 1999-2000, en el ámbito de un programa de "Estudio Estratégico para el Desarrollo de la Geotermia en el Ecuador", promovido por el Ministerio de Energía y Minas de Ecuador con el patrocinio de OLADE y la colaboración del Proyecto Regional de Aprovechamiento de los Recursos Geotérmicos en América Latina y El Caribe, de CEPAL (CEPAL, 2000).

En 2009 el Gobierno de Ecuador reanudó la exploración del área dedicando algunos fondos a través del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) para perforar cuatro pozos someros de diámetro reducido. El primer pozo fue ubicado en la parte baja del flanco oriental del Volcán Chiles y alcanzó la profundidad de 554 m, encontrando una secuencia de depósitos volcánico-clásticos de baja permeabilidad. El programa fue luego interrumpido sin perforar los demás pozos programados y, desafortunadamente, sin realizar mediciones de temperatura en el pozo perforado (Beate et al., 2015).

En años recientes, el proyecto retomó su relevancia en el contexto binacional. En julio de 2010 los Gobiernos de Colombia y Ecuador firmaron un nuevo acuerdo para financiar conjuntamente la exploración del potencial geotérmico en la región fronteriza y delegaron respectivamente a la empresa eléctrica ISAGEN y a la empresa pública CELEC EP para implementar el proyecto. La evaluación de la información disponible efectuada por ISAGEN y CELEC EP concluyó con la recomendación de llevar a cabo investigaciones de superficie adicionales para definir de manera apropiada la ubicación del recurso y sus perspectivas de desarrollo, por lo cual ambas empresas han firmado un acuerdo de cooperación en abril del 2012 para realizar nuevos estudios a nivel de pre-factibilidad en un área de 490 km², mediante la contratación de una compañía especializada en exploración geotérmica. El trabajo planificado incluye estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos (MT/TDEM), la perforación de pozos de gradiente y la selección de objetivos para pozos exploratorios profundos. El contrato para la ejecución de dichas

¹⁰⁷ Información reportada en Beate y Salgado (2005) e INER (2015).

actividades fue adjudicado a la empresa SYR¹⁰⁸ a finales de 2013. Los estudios iniciaron en 2014 en el lado ecuatoriano (Mejía et al, 2014; Beate et al., 2015), pero no hubo ulterior información publicada en cuanto al avance y resultados del trabajo.

Otras actividades en curso por parte del consorcio ISAGEN - CELEC EP corresponden a la preparación de estudios de impacto ambiental y a la socialización del proyecto con las comunidades locales, que incluyen a grupos indígenas. Según reportado en algunos medios de información parece que las comunidades indígenas aledañas a la zona del proyecto, particularmente en el lado colombiano, han expresado preocupación por las actividades geotérmicas¹⁰⁹ y, de hecho, existen antecedentes de significativa oposición al cercano proyecto geotérmico del Volcán Azufral, en el mismo Departamento de Nariño. Cabe además observar que el área de interés geotérmico interfiere con la Reserva Natural Volcán Cumbales - Chiles, en Colombia, y con la Reserva Ecológica El Ángel, en Ecuador, que son áreas protegidas para la conservación del páramo andino.

Volcán Azufral

El área geotérmica de Azufral se encuentra en la Cordillera Occidental del suroeste de Colombia, en el Departamento de Nariño, unos 25 km al norte de la frontera con Ecuador (mapa 8). La ciudad de Túquerres se encuentra en la base de la ladera oriental del Azufral y una carretera rodea buena parte del edificio volcánico, así que el sector cuenta en general con buenas condiciones de acceso y logística. El área presenta también una ubicación favorable con respecto a la línea de interconexión eléctrica en 220 kV entre Colombia y Ecuador la cual pasa unos 25 km al este.

El Azufral es un estrato-volcán (4.070 m s.n.m.) de composición andesítica a riódacítica, caracterizado por un cráter de 3 km de diámetro en su cumbre, el cual contiene una serie de domos riódacíticos asociados con manifestaciones termales (fumarolas y cráteres de explosión freáticas). Es un volcán cuaternario, formado durante los últimos 0,6 Ma, y con significativa actividad en tiempos recientes e históricos, documentada por varios productos eruptivos datados entre 18.000 y 280 años; por lo cual el Azufral es considerado un volcán activo. Además de las fumarolas (85°C) y zonas de alteración en el cráter, el sistema geotermal está representado por varios grupos de manantiales termales de aguas cloruradas y bicarbonatadas-cloruradas alrededor del edificio volcánico y en su ladera noreste. Aunque la temperatura de los manantiales clorurados no supera los 55°C, su composición química, según Alfaro et al. (2015), revela una significativa contribución de fluido geotérmico profundo.

El área del Volcán Azufral había sido clasificada de alta prioridad por el estudio de reconocimiento geotérmico nacional efectuado en 1982 pero no recibió particular atención hasta finales de los años '90, cuando el gobierno colombiano encargó a INGEOMINAS la realización de investigaciones geotérmicas en el país. INGEOMINAS se interesó seguidamente por el área llevando a cabo una revisión de la información disponible integrada con estudios geológicos, vulcanológicos y geoquímicos, y publicó una síntesis de las características del prospecto geotérmico (Bernal, 1998; Alfaro, 2000). Luego la iniciativa obtuvo el apoyo del BID, con financiamiento del Fondo Fiduciario del Japón para Servicios de Consultoría (JCF), para realizar un estudio de pre-factibilidad a ser ejecutado por INGEOMINAS. La ejecución del estudio fue asignada en abril del 2001, mediante licitación internacional, al consorcio de firmas consultoras West Japan Engineering Consultants y Geohazards Consultants International; sin embargo, el proyecto fue cancelado en agosto del 2002 sin poder dar inicio a los estudios, debido a problemas de seguridad en la zona y falta de apoyo de las autoridades locales (Rosas Calderón, 2013; Alfaro et al., 2015).

El servicio geológico colombiano siguió investigando el área, completando la cartografía geológica en 2003 y llevando a cabo un programa de exploración geotérmica a partir del 2006, con estudios de alteración hidrotermal, geoquímica de aguas y gases termales y prospecciones geofísicas (gravimetría, magnetometría y SEV). La integración de los resultados llevó a la interpretación de un modelo conceptual preliminar del sistema geotérmico, el cual ha sido publicado recientemente. El

¹⁰⁸ SYR Geociencias S.A., subsidiaria en Ecuador de la canadiense SYR & Whistler Consulting Group. <http://www.syr-whistler.com/espanol/pagespa.html>.

¹⁰⁹ <http://piensageotermia.com/archives/22226>.

modelo propuesto es consistente con un típico sistema geotérmico de alta temperatura asociado con volcanismo reciente, y define un sector de significativa extensión (21 km) dentro del cual se extendería potencialmente el recurso geotérmico. Los datos geotermométricos indican una temperatura del reservorio de 225°C y posiblemente superior, en el rango 250-280°C. (Alfaro et al., 2015).

El área geotérmica de Azufral se encuentra en la zona de influencia de cinco reservas indígenas. Las comunidades nativas consideran al Volcán Azufral, y particularmente a la laguna en su cráter (Laguna Verde), como sitio sagrado. El edificio volcánico es también parte de una zona de conservación forestal regional y reserva natural. Las comunidades locales han manifestado temor por la explotación sin control y el daño a los ecosistemas naturales, junto con la posible expropiación de sus territorios, lo cual ha llevado a una fuerte oposición al proyecto y negación a cualquier acercamiento y conversación sobre el tema (Rosas Calderón, 2013; Alfaro et al., 2015).

Nevado del Ruiz

El Nevado del Ruiz es parte de un imponente complejo volcánico activo ubicado en la cordillera occidental de Colombia, 135 km al oeste de Bogotá (mapa 8). En la literatura geotérmica colombiana, el área del Nevado del Ruiz es generalmente considerada parte de una más amplia zona geotérmica que abarca al sector de cordillera volcánica comprendido entre el Cerro Bravo al norte y el Cerro Machín al sur, con una longitud de 70 km y una extensión de aproximadamente 2.000 km². Este tramo de cordillera, además del Nevado del Ruiz, contiene otros importantes centros volcánicos (Cerro Bravo, Santo Domingo, Santa Rosa de Cabal, El Bosque, Nevado de Tolima, Cerro Machín) asociados con un total de aproximadamente 100 manifestaciones termales, es decir un tercio de todas las manifestaciones conocidas en Colombia. Las manifestaciones son divididas en varios grupos asociados con los volcanes principales y muy probablemente correspondientes a prospectos geotérmicos independientes (Alfaro et al., 2002). Alrededor del Nevado del Ruiz existen tres diferentes grupos de manifestaciones termales denominados sector nororiente, sector suroriental y sector occidental. En el sector occidental se encuentran fuentes termales con aguas cloruradas de alta temperatura (hasta 93°C en Botero-Londoño) que son consideradas descargas de un reservorio geotérmico profundo (Alfaro et al., 2002).

El sector occidental del Nevado del Ruiz, que comprende a las zonas termales de Las Nereidas, Botero-Londoño, El Recodo y Chorro Negro, fue identificado ya en los años '60 como una zona muy promisoriosa para la exploración geotérmica, y a la fecha sigue siendo la zona geotérmica más conocida y estudiada de Colombia. El área de mayor interés se extiende en la ladera oeste del Nevado del Ruiz, a elevaciones de 3.200-4.000 m s.n.m., en un sector algo remoto, poco poblado, localmente con morfología abrupta, y accesible con ciertas dificultades mediante caminos secundarios. Las carreteras principales más cercanas rodean la base del complejo volcánico, a distancias de 20-25 km del sector de mayor interés geotérmico. La ciudad más cercana es Manizales, ubicada unos 20 km al noroeste. Tramos importantes del sistema de transmisión eléctrica nacional pasan por el valle al oeste del complejo volcánico, donde se encuentran las ciudades de Manizales y Pereira, a distancia de 20-30 km desde la zona de mayor interés geotérmico.

La porción más elevada del complejo volcánico (superior a los 3.800 m s.n.m. en la ladera occidental del Nevado del Ruiz), es parte del amplio Parque Nacional Natural de los Nevados, el cual es un área protegida creada por el Estado en 1974, con el fin de conservar los ecosistemas alto andinos. Es muy probable que proyectos de desarrollo geotérmico lleguen a interferir con la zona del parque, lo cual puede implicar restricciones de carácter ambiental.

Las primeras investigaciones geotérmicas en el área fueron realizadas por la empresa CHEC, que en 1968 contrató al Ente Nacional de Electricidad de Italia (ENEL) para realizar un estudio de reconocimiento que evaluó los rasgos geotermales en un área de 1.500 km² alrededor del Nevado del Ruiz y otros centros volcánicos aledaños. El estudio identificó algunas zonas prometedoras y recomendó continuar la exploración con investigaciones geológicas, geoquímicas y geofísicas. Sin embargo las investigaciones no continuaron en ese entonces, sino fueron retomadas quince años después por la misma CHEC, que en 1983 completó un estudio de pre-factibilidad y seleccionó tres

zonas (Nereidas, Laguna de Otún y Volcán Machín) prioritarias para la perforación exploratoria (Battocletti et al., 1999; Alfaro et al., 2000; Alfaro et al., 2002).

Sucesivamente al estudio de pre-factibilidad, las actividades de exploración fueron nuevamente suspendidas. Se mencionan solamente algunos estudios, realizados a raíz de la desastrosa erupción del Nevado del Ruiz en 1985 (Sturchio et al., 1988, Giggenbach et al., 1990; Larios, 1992 - mencionados en Alfaro et al., 2002), que interpretaron el modelo del sistema magmático e hidrotermal asociado con el complejo volcánico activo.

En 1992 la empresa consultora mexicana Geocónsul llevó a cabo por cuenta de CHEC una revisión de la información compilada en el estudio de pre-factibilidad, y efectuó estudios geológicos y muestreos geoquímicos adicionales con el fin de programar una perforación exploratoria. En 1997 Geoenergía Andina S.A. (GESA, subsidiaria de CHEC) perforó un pozo (Nereidas-1) en proximidad de la zona termal de Las Nereidas, el cual alcanzó los 1.466 m de profundidad y encontró aproximadamente 200°C, pero sin permeabilidad, por lo cual el proyecto fue sucesivamente suspendido por CHEC (Monsalve et al., 1998; Alfaro et al., 2002; Mejía et al., 2014).

A partir de 1997, cuando el Gobierno encargó a INGEOMINAS (Servicio Geológico Colombiano) la realización de investigaciones geotérmicas en el país, la institución inició a efectuar trabajos de investigación en el área, estudiando la geología y alteración hidrotermal del pozo Nereidas-1 (Monsalve et al., 1998) e implementando un programa de documentación, muestreo e interpretación geoquímica de manifestaciones termales, enfocado en investigación geotérmica y vigilancia de la actividad volcánica (Alfaro et al., 2002). El Servicio Geológico Colombiano sigue actualmente con programas de investigación en la zona, que incluye la ejecución de levantamientos MT alrededor del edificio del Nevado del Ruiz, para complementar la modelación del sistema magmático activo y procesos hidrotermales asociados, así como cartografía geológica, estudios de riesgo volcánico y vigilancia geoquímica y geofísica de la actividad volcánica e hidrotermal (Alfaro 2015).

El interés para el desarrollo comercial de los recursos geotérmicos en la zona del Nevado de Ruiz no volvió sin embargo a surgir hasta en 2008-2010, cuando las empresas eléctricas nacionales EPM e ISAGEN, iniciaron a interesarse en el proyecto.

La empresa EPM, mediante su subsidiaria CHEC, retomó en 2009 las actividades de exploración en el sector de Las Nereidas, y contrató a la firma consultora Dewhurst Group LLC para efectuar investigaciones socio-ambientales y nuevos estudios geológicos y geofísicos, incluyendo a un levantamiento magneto-telúrico. Algunos resultados han sido publicados recientemente (García et al., 2013; Trujillo et al., 2014; Dewhurst, 2014). EPM-CHEC está actualmente enfocada en un sector de 60 km² en la ladera occidental del Nevado del Ruiz, donde ha estimado en forma preliminar y conservativa un potencial desarrollo de 50 MWe¹¹⁰ y planea perforar pozos exploratorios profundos para confirmar el recurso (Alfaro, 2015).

ISAGEN está trabajando desde 2010 en dos áreas con una extensión total de 350 km² en el flanco septentrional y occidental del Nevado del Ruiz, seleccionadas afuera del Parque Nacional Natural de Los Nevados (ISAGEN, 2012). Una de dichas zonas abarca también al sector de Las Nereidas, donde se entiende que está ubicado el proyecto de ECP-CHEC. Durante los últimos 5 años, ISAGEN ha llevado a cabo diferentes proyectos de investigación en colaboración con instituciones nacionales e internacionales, y con la participación de empresas consultoras especializadas en exploración geotérmica. Dichos proyectos comprendieron investigaciones geológicas, geoquímicas y geofísicas (gravimetría, magnetometría, MT), la perforación de tres pozos de gradiente a 300 m de profundidad y culminaron con la elaboración de un estudio de pre-factibilidad del campo geotérmico del Macizo Volcánico del Ruiz, completado en 2013 con la colaboración del BID y JFC y con la participación de la empresa consultora japonesa Nippon Koei. Actualmente el proyecto se encuentra en fase de evaluación ambiental y preparación para la perforación de cinco pozos exploratorios en el área denominada Villamaría, en el flanco occidental del Nevado del Ruiz. Dichos pozos están planificados para alcanzar

¹¹⁰ <http://piensageotermia.com/archives/21736>.

profundidades entre 1.700 y 2.700 m para encontrar un reservorio con temperatura de aproximadamente 200°C (Marzolf, 2014; Mejía, 2014; Alfaro, 2015). En febrero del 2015 ISAGEN firmó un memorando de entendimiento con la empresa japonesa Toshiba para desarrollar el proyecto e instalar una planta geotermo-eléctrica de 50 MWe, la cual entraría en operación comercial en el 2020. ISAGEN actuaría como promotora del proyecto, que sería desarrollado por las firmas especializadas en geotermia West Jec y Schlumberger. Toshiba construiría la planta y suministraría los equipos principales, mientras que Schlumberger perforaría los pozos y construiría los sistemas de transporte de vapor¹¹¹.

Los detalles de las evaluaciones y modelaciones del recurso llevadas a cabo independientemente por EPM-CHEC y por ISAGEN no han sido publicados, sin embargo la información disponible de todos los estudios realizados durante más de 40 años en la zona del Nevado del Ruiz, y particularmente en su ladera occidental, define un marco favorable para la existencia de un importante sistema geotérmico de alta temperatura. La presencia de aproximadamente 200°C a menos de 1.500 m de profundidad ya ha sido demostrada por el pozo Nereidas-1, mientras que los geotermómetros geoquímicos indican temperaturas de reservorio que pueden alcanzar los 250-260°C (Alfaro, 2002; Alfaro, 2005). En cuanto al potencial del recurso, no hay mucha información disponible, pero dado el contexto geo-vulcanológico y la extensión del área con manifestaciones termales, es presumiblemente significativo. Los proyectos de desarrollo planificados por EPM-CHEC e ISAGEN consideran la instalación de una planta geotérmica de 50 MWe cada uno, lo cual indicaría un potencial de por lo menos 100 MWe, sin embargo ambas iniciativas se encuentran en el mismo sector de la ladera occidental del Nevado del Ruiz y no está claro cuales sean las relaciones entre los dos proyectos, el área específica y el recurso considerado para cada desarrollo.

Paipa

El prospecto geotérmico de Paipa se encuentra en la zona axial de la cordillera andina oriental de Colombia, 150 km al noreste de Bogotá, unos 5 km al sur de la ciudad de Paipa (mapa 8). Se trata de un área rural que se extiende con morfología suave a elevaciones de 2.500-2.650 m s.n.m., fácilmente accesible y desarrollada, por lo tanto presenta buenas condiciones logísticas para el eventual desarrollo de un proyecto geotérmico.

En la zona existen varias fuentes termales con aguas sulfatadas de elevada salinidad que son históricamente reconocidas por sus beneficios terapéuticos, y son utilizadas en balnearios termales con una floreciente industria turística asociada. Las instalaciones termales representan una importante componente para la economía local, por lo tanto podrían surgir conflictos con la eventual explotación del recurso geotérmico para fines energéticos. Aunque no se conoce hasta la fecha de oposiciones a las investigaciones geotérmicas, hay antecedentes de oposición por parte del sector empresarial dedicado al turismo termal hacia otras actividades extractivas en la zona (puzolana y materias primas para producción de cemento).

El termalismo en la zona de Paipa ha sido objeto de investigaciones a partir de la primera mitad de 1800, enfocadas en el estudio de la composición química de las aguas y sus principios terapéuticos. La primera investigación con fines geotérmicos corresponde al estudio de reconocimiento nacional de 1982, el cual clasificó a la zona de Paipa como un sector de prioridad medio-alta. El resultado llamó en ese entonces la atención del organismo japonés JCF el cual evaluó en 1983 las perspectivas de desarrollo geotérmico del área concluyendo que era necesario efectuar investigaciones más avanzadas para determinar las posibilidades de implementar un proyecto geotermo-eléctrico. Sin embargo, las investigaciones no continuaron y durante las dos décadas siguientes el área fue objeto de pocos estudios de carácter geológico e hidro-geoquímico, promovidos por la Universidad Nacional de Colombia y por la OIEA (Ferreira y Hernández, 1988 - reportado en Alfaro et al., 2010; Bertrami et al., 1990).

A partir del 2002 el área de Paipa fue incluida en los programas de investigación geotérmica del servicio geológico nacional (INGEOMINAS y sucesivamente SGC) que, en colaboración con la Universidad Nacional de Colombia, ha llevado a cabo una amplia gama de estudios enfocados en la caracterización y comprensión del sistema hidrotermal. La integración de estudios geológicos, vulcanológicos, de alteración hidrotermal, hidrogeoquímicos, levantamientos de gases en suelo, y

¹¹¹ <http://www.portafolio.co/negocios/isagen-y-toshiba-pacto-energia-geotermica>.

geofísicos (gravimetría, magnetometría, geoelectrica) llevó a la definición de un modelo preliminar del sistema geotérmico de Paipa, el cual fue publicado en 2010 (Alfaro et al., 2010). Sucesivamente el servicio geológico nacional continuó realizando investigaciones geoquímicas y geofísicas complementarias cuyos resultados han sido recientemente publicados por Alfaro (2015). Ciertas actividades, en particular la adquisición de nuevos datos MT para modelación 3D, están actualmente en curso con el objetivo final de integrar toda la información, actualizar el modelo conceptual del sistema geotérmico y planificar un pozo exploratorio profundo (Alfaro 2015; Moyano, 2015).

En la zona existen depósitos volcánicos explosivos de composición riolítica y traquítica, de edad Plio-Pleistocena (1,9-2,5 Ma), que son atribuidos a un centro de emisión ubicado 7 km al sur de la ciudad de Paipa. Éste se compone por un edificio fuertemente erosionado que terminó con un colapso calderico de 3 km de diámetro, seguido por una fase de resurgencia con formación y colapso de domos intra-caldericos (Alfaro, 2010; Pardo, 2005). En el sector entre el centro volcánico y la ciudad de Paipa se encuentran varias manifestaciones termales, comúnmente agrupadas en correspondencia de importantes intersecciones estructurales. En su mayoría se trata de manantiales termales, con temperatura de hasta 76°C, a menudo asociados con abundante flujo de CO₂; pero también existen emisiones de vapor de baja temperatura (75°C) y emisiones de CO₂. Las fuentes más distales del centro volcánico presentan un elevado contenido salino (55.000 mg/l) dominado por sulfato de sodio, que es también extraído para usos industriales en una pequeña planta.

Las características geoquímicas de las aguas termales son dominadas por una fuerte contribución de aguas someras de elevada salinidad (aparentemente determinada por interacción con secuencias sedimentarias que contienen niveles evaporíticos), que se mezclan con un fluido geotérmico de origen más profundo. Este proceso de mezcla modifica sustancialmente las características de la componente geotérmica profunda, limitando la aplicación de las herramientas de interpretación geoquímica y geotermométrica. Sin embargo, todas las interpretaciones geoquímicas reportadas en literatura coinciden en la presencia de un recurso geotérmico con temperatura relativamente elevada, en el rango entre 175°C y 230°C (Bertrami et al., 1990; Alfaro et al., 2010). No hay reporte en literatura de estimaciones del potencial del recurso.

4. Potencial geotermo-eléctrico

Colombia, a pesar de tener una identificación bastante avanzada de sus recursos geotérmicos, no dispone de una evaluación detallada del potencial geotérmico a nivel nacional. Estimaciones de potencial son disponibles solamente para el proyecto binacional Tuffiño - Chiles - Cerro Negro (138 MWe, mientras que en la zona del Nevado del Ruiz se conocen planes para la instalación de dos plantas geotermo-eléctricas de 50 MWe, respectivamente por parte de EPM-CHEC e ISAGEN, por lo cual se supone que el potencial estimado para el recurso en esa zona debería ser por lo menos de 100 MWe, aunque no hay datos publicados al respecto y las relaciones entre ambos proyectos y el recurso que cada uno considera explotar no están claras.

El único dato disponible para el potencial del recurso geotérmico a nivel nacional es la evaluación efectuada por Gawell et al. (1999), la cual estima para Colombia un potencial variable entre 700 y 1.370 MWe, que podría sin embargo aumentar hasta los 2.210 MWe en condiciones de desarrollo tecnológico más avanzado, no mejor especificado.

5. Situación actual y perspectivas de desarrollo

Colombia no cuenta con una legislación específica para las actividades geotérmicas. La exploración y explotación geotérmica no está reguladas de forma clara, no existe un sistema de concesiones, así como no hay un marco bien definido de derechos y obligaciones para el desarrollo de proyectos geotermo-eléctricos. Esto constituye una limitante significativa para impulsar un sector geotérmico eficiente y atractivo para la inversión privada.

El país cuenta con un reconocimiento bastante avanzado del recurso geotérmico, derivado de varios estudios realizados en el transcurso de los últimos 45 años, e intensificados a partir de 1997

cuando el Gobierno encargó a INGEOMINAS (sucesivamente Servicio Geológico Colombiano-SGC, a partir de 2011) la realización de investigaciones geotérmicas. En varios proyectos los estudios han sido llevados hasta etapas avanzadas de exploración de superficie, pero sin consolidarse en iniciativas enfocadas hacia un efectivo desarrollo del recurso. De hecho, ninguno de los proyectos cuenta con perforaciones que confirmen la existencia de un recurso comercialmente explotable.

En los últimos 5 años, las empresas energéticas nacionales ISAGEN y EPM han iniciado a involucrarse en el sector geotérmico reactivando la exploración en el proyecto binacional Tufiño - Chiles - Cerro Negro y en la zona del Nevado del Ruiz. El proyecto binacional se activó a raíz de un acuerdo firmado en 2010 entre los Gobiernos de Colombia y Ecuador para la exploración del potencial geotérmico en la zona fronteriza, y está a cargo de ISAGEN en colaboración con la ecuatoriana CELEC EP. Este proyecto ha estado avanzando lentamente y ha encontrado fuerte oposición social, particularmente en territorio colombiano. En el Nevado del Ruiz, tanto EPM como ISAGEN han efectuado estudios en una zona del sector occidental del complejo volcánico y ambas empresas han anunciado planes para instalar una planta geotermo-eléctrica de 50 MWe. Cabe sin embargo observar que en ambos casos no se cuenta todavía con un recurso confirmado, y además no está claro cuales sean las relaciones entre los dos proyectos, el área específica y el recurso considerado para cada desarrollo, así como los derechos de explotación que cada empresa posee en amparo de sus respectivos programas de inversión.

En cuanto a ISAGEN, originalmente controlada por el estado con una participación del 57,61%, cabe reportar que a mediados de enero del 2016 la empresa fue totalmente privatizada mediante venta de la participación estatal al fondo de inversión canadiense Brookfield Asset Management¹¹². Este evento ha inducido cierta preocupación en el sector, por el hecho que la privatización de la única empresa de generación de energía de propiedad estatal podría poner en peligro la expansión del sistema eléctrico del país y varios proyectos de energía renovable, incluyendo a los proyectos geotérmicos que ISAGEN tiene en su cartera¹¹³.

El Servicio Geológico Colombiano, por su parte, en los últimos años ha avanzado significativamente con las exploraciones de superficie en otras áreas prioritarias (Azufral y Paipa) y con estudios de reconocimiento regional que han llevado también a la identificación de nuevos prospectos, como el reciente descubrimiento en la zona de San Diego (Alfaro, 2015). El contexto regulatorio y de política nacional en cuanto al desarrollo geotérmico no define sin embargo una ruta clara para la continuación de estos proyectos más allá de la fase inicial de reconocimiento y estudios de superficie.

Los organismos internacionales han también enfocado su atención en facilitar el desarrollo geotérmico en Colombia. El BID, en colaboración con otros organismos (JCF, GEF), está apoyando al Gobierno Colombiano para mejorar el marco regulatorio, reducir incertidumbres técnicas y promover el desarrollo del recurso geotérmico¹¹⁴, y ha estado contribuyendo en particular al financiamiento de las exploraciones de ISAGEN en la zona del Nevado del Ruiz (Marzolf, 2014). Por otro lado, Colombia está entre los países elegidos para la implementación del “Geothermal Development Fund” (GDF) para América Latina, enfocado en a la mitigación de riesgos en las fases iniciales de perforación exploratoria, que la KfW de Alemania, en colaboración con otros organismos multilaterales, ha lanzado a finales del 2014 y planea poner en operación a partir del 2016¹¹⁵.

Las condiciones generales definen por lo tanto buenas perspectivas para el desarrollo del sector geotérmico en Colombia, pero en un contexto todavía poco maduro y en presencia de ciertas limitantes que necesitan ser apropiadamente consideradas y manejadas. La implementación de un marco regulatorio específico para la geotermia, la articulación y gestión integrada de las oposiciones sociales y el involucramiento de entidades con capacidad técnica y financiera para desarrollar el recurso, constituyen factores fundamentales para el éxito de cualquier iniciativa geotérmica en el país.

¹¹² <http://lta.reuters.com/article/domesticNews/idLTAKCN0UR22M20160113>.

¹¹³ <http://piensageotermia.com/archives/28554>.

¹¹⁴ <http://www.iadb.org/en/projects/project-description-title,1303.html?id=co-x1009>.

¹¹⁵ http://www.ndf.fi/sites/ndf.fi/files/gdf_launch_press_notification_0481214.pdf

E. Ecuador

1. Reseña histórica de la investigación geotérmica

La investigación geotérmica en Ecuador comenzó a finales de los años '70, en el marco de una iniciativa promovida por OLADE para realizar estudios de reconocimiento en la cordillera volcánica de los Andes colombianos y ecuatorianos. En 1979-1980 el Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL), en colaboración con OLADE y con la participación del BRGM de Francia y de la empresa consultora italiana Aquater, inició el "Proyecto de Investigación Geotérmica de la República de Ecuador" con el objetivo de seleccionar áreas de interés para la exploración de recursos geotérmicos aptos para generación de electricidad. Los primeros estudios abarcaron la cordillera volcánica cuaternaria de Los Andes y concluyeron con la identificación de dos grupos principales de zonas de interés: uno clasificado de alta temperatura, que comprende a las áreas de Tufiño, Chachimbiro y Chalupas, y uno de baja temperatura con las áreas de Ilaló, Chimborazo y Cuenca. El informe de esta primera etapa de estudio a nivel nacional recomendó profundizar las investigaciones en las áreas geotérmicas más prometedoras de Tufiño, Chachimbiro y Chalupas (Lloret y Labus, 2014; Beate y Salgado, 2005).

En los años '80, el INECEL continuó liderando el proyecto de exploración geotérmica en Ecuador, con el apoyo de OLADE. En 1981 las investigaciones siguieron con un programa denominado "Fase I del Estudio de Prefactibilidad", que contrató a la firma consultora Geotermica Italiana para efectuar estudios de geología, hidrogeología y geoquímica en las áreas de Tufiño, y Chalupas. En Tufiño, dada su ubicación en la frontera con Colombia y considerando que las actividades de reconocimiento geotérmico en territorio colombiano habían identificado al mismo sector como un área de interés prioritario (bajo el nombre Chiles - Cerro Negro), OLADE promovió la realización de un programa de estudios simultáneo entre INECEL de Ecuador e ICEL de Colombia, para integrar la información geotérmica en un solo proyecto. Esto llevó sucesivamente a que los gobiernos de ambos países suscribiesen un acuerdo para explorar conjuntamente el área, el cual marcó el inicio, en 1982, del "Proyecto Geotérmico Binacional Tufiño - Chiles - Cerro Negro" (Alfaro et al., 2000; CEPAL, 2000; Beate y Salgado, 2005; Lloret y Labus, 2014; Mejía et al., 2014).

A partir de ese momento el proyecto binacional se convirtió en el objetivo prioritario para la exploración geotérmica en Ecuador, donde fueron concentrados los esfuerzos para la realización de un estudio completo a nivel de pre-factibilidad. OLADE continuó promoviendo las actividades en colaboración con INECEL e ICEL (Colombia), y canalizando ayuda financiera del Gobierno de Italia. El estudio de pre-factibilidad fue completado en 1987 con un informe realizado por la firma consultora italiana Aquater, el cual proporcionó resultados favorables para la existencia de un recurso de alta temperatura asociado con el Volcán Chiles (Alfaro et al., 2000; CEPAL, 2000; Beate y Salgado, 2005; Lloret y Labus, 2014).

Paralelamente fueron efectuados también estudios en otras áreas indicadas. Entre 1986 y 1990, INECEL con el apoyo de la OIEA¹¹⁶ llevó a cabo un programa de investigaciones con técnicas geoquímicas e isotópicas en varias áreas termales a lo largo de la cordillera volcánica (Tufiño, Chachimbiro, Cuicocho, Papallacta, Chalupas, Tungurahua, Chimborazo y Cuenca). Por otro lado, en 1985 el Instituto Nacional de Energía (INE) se dedicó a la exploración de recursos de baja entalpía con el objetivo de sustituir en las zonas industriales de Quito y Cuenca los combustibles utilizados para la producción de agua caliente. El proyecto no prosperó debido al costo muy bajo de la alternativa con combustible y a la dispersión geográfica de las plantas industriales¹¹⁷ (Almeida et al., 1990; Beate y Salgado, 2005; Lloret y Labus, 2014).

A principios de los años '90 el INECEL evaluó el estado del conocimiento geotérmico en el país y sintetizó toda la información disponible en documentos internos que incluyeron también una estimación preliminar del recurso basada en los datos de superficie disponibles y aplicando el método

¹¹⁶ Contrato de Investigación 3991/IG, suscrito entre OIEA e INECEL.

¹¹⁷ Aguilera Ortiz E. <http://publiespe.espe.edu.ec/articulos/geologia/energia-geotermica/geotermica.htm>.

volumétrico de calor almacenado (Almeida, 1990 e 1992 - reportados en Beate y Salgado, 2005); pero luego el programa geotérmico de INECCEL fue suspendido en 1993 por razones políticas y falta de financiamiento (Beate y Salgado, 2005; Lloret y Labus, 2014). Este evento cerró un ciclo, durado desde 1978 hasta 1992, caracterizado por la dedicación de importantes esfuerzos a la exploración del recurso geotérmico nacional bajo el liderazgo de INECCEL.

En los años siguientes se reporta solamente un estudio adicional de geofísica (MT) financiado por entidades privadas en la zona de Tufiño (Tecniseguros, 1994 - mencionado en Beate y Salgado, 2005), actividades de promoción, recopilación y evaluación de datos previos y algunas investigaciones científicas. A finales de los años '90 el Gobierno de Ecuador recibió asistencia técnica de la CEPAL para definir una estrategia para la explotación de recursos geotérmicos en el país¹¹⁸. La asistencia técnica de CEPAL fue implementada mediante la constitución de un “Grupo Nacional de Trabajo en Geotermia del Ecuador” creado por el Ministerio de Energía y Minas con el patrocinio de OLADE, y se concretó con la realización de un “Estudio Estratégico para el Desarrollo de la Geotermia en el Ecuador”, el cual incluyó un análisis detallado del entorno socioeconómico y ambiental, situación y perspectivas del proyecto binacional Tufiño - Chiles - Cerro Negro (CEPAL, 2000; Lloret y Labus, 2014). Entre 1999 y 2001 se activó también un nuevo programa de investigación de la OIEA¹¹⁹ el cual contribuyó con estudios geoquímicos adicionales en diferentes áreas geotérmicas, y particularmente en Chachimbiro (Aguilera et al., 2005); mientras que en 2001 el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC) efectuó ulteriores evaluaciones de síntesis y actualización de datos sobre áreas de interés geotérmico del Ecuador (Aguilera 2001, reportado en Beate y Salgado, 2010). Sin embargo, todas estas iniciativas no lograron impulsar el desarrollo geotermo-eléctrico y la actividad geotérmica se paró totalmente con el inicio de la crisis financiera de Ecuador en el 2002. De hecho, desde 1996 hasta el 2007 el sector eléctrico de Ecuador se caracterizó por la implementación de un modelo de libre mercado que llevó prácticamente al abandono de las iniciativas geotérmicas, aunque no faltaron los esfuerzos para promover el desarrollo del sector. Beate y Salgado (2010) señalan como causas relevantes también la ausencia de un marco regulatorio apropiado y la falta de financiamiento para las perforaciones iniciales de alto riesgo.

El interés para la geotermia volvió a surgir en 2007 cuando la necesidad de diversificar la matriz energética se volvió en política nacional, con mandato de inversión del Estado en los sectores energéticos. En 2008 el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) reactivó las actividades de exploración geotérmica con una evaluación del área de Chalupas y un resumen de la situación y perspectivas de 22 prospectos previamente identificados en el país. En 2009 las actividades siguieron con la realización de estudios de reconocimiento en la zona de Chacana y con un programa para perforar cuatro pozos someros de diámetro reducido en Tufiño - Chiles - Cerro Negro, el cual fue sin embargo suspendido después de la perforación del primer pozo (Lloret y Labus, 2014; Beate y Urquiza, 2015).

En 2010 el MEER, con la colaboración de un consultor especializado, preparó un “Plan para el Desarrollo de Recursos Geotérmicos”, con énfasis en generación de electricidad, para seleccionar los proyectos de mayor interés (Chachimbiro, Chalpatán, Chacana-Jamanco, Chalupas, Guapán, Chacana-Cachiyacu, Tufiño, Chimborazo, Chacana-Oyacachi, Baños de Cuenca y Alcedo) y clasificarlos en orden de prioridad. La empresa eléctrica nacional CELEC EP fue delegada por el MEER para la investigación y desarrollo de proyectos geotérmicos en el Ecuador y, siempre en 2010, el Gobierno de Ecuador firmó un nuevo convenio con el Gobierno de Colombia para el desarrollo conjunto del proyecto binacional Tufiño - Chiles - Cerro Negro (Lloret y Labus, 2014; Beate y Urquiza, 2015).

De esta manera, en los últimos cinco años CELEC EP ejecutó diferentes estudios en las áreas consideradas más promisorias (Chachimbiro, Tufiño - Chiles - Cerro Negro y Chacana). Otras investigaciones han sido realizadas por el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) que se dedicó a la elaboración de un “Plan de Líneas de Investigación para el

¹¹⁸ Entre 1996 y 1998 CEPAL, con apoyo de la Unión Europea, implementó un “Proyecto Regional de Aprovechamiento de los Recursos Geotérmicos en América Latina y El Caribe”, el cual identificó a Ecuador como un país prioritario para la realización de proyectos de desarrollo geotérmico. El Gobierno de Ecuador solicitó sucesivamente el apoyo de CEPAL.

¹¹⁹ OIEA - Proyecto de Cooperación Técnica con Ecuador ECU/8/019.

Desarrollo de la Geotermia” (INER, 2015) y a la realización de estudios en los prospectos de Chalpatán y Baños de Cuenca. Los resultados más relevantes incluyen a los estudios de pre-factibilidad en las áreas de Chachimbiro, Chacana-Jamanco y Chacana-Cachiyacu, realizados entre 2011 y 2012 por la empresa consultora SYR¹²⁰; la evaluación del área de Chalpatán, efectuada en 2013 por la empresa española CGS¹²¹, y la contratación de estudios complementarios y perforaciones en Tufiño - Chiles - Cerro Negro, adjudicados a la empresa SYR y actualmente en fase de ejecución, en el marco de un acuerdo firmado en 2012 con la contraparte colombiana ISAGEN para completar la pre-factibilidad del proyecto (Lloret y Labus, 2014; Mejía et al., 2014; Alfaro, 2015; Beate y Urquizo, 2015).

2. Marco legal

La geotermia, como parte del sector energético, es considerada por la nueva Constitución ecuatoriana del 2008 un sector estratégico de la economía, por lo cual es parte de la política de desarrollo de la Nación. El Estado se reserva el derecho de administrar, regular, controlar y manejar el sector energético, incluyendo la explotación de los recursos naturales renovables y no renovables, que debe ser efectuada por entidades estatales, aunque el Gobierno puede excepcionalmente y bajo regulación específica delegar ciertas funciones a entidades privadas.

A partir del 2007, el Gobierno de Ecuador ha establecido un marco de referencia para el desarrollo del país denominado Plan Nacional del Buen Vivir¹²², el cual persigue en política energética la reestructuración de la matriz de generación bajo criterios de soberanía energética y sustentabilidad, con incremento de la participación de energías renovables. Consecuentemente, el Gobierno ha estado implementando significativas acciones de promoción del uso de las energías renovables, creando instituciones y asignando fondos públicos para la investigación y explotación de los recursos renovables, incluyendo a la geotermia.

La legislación de Ecuador cuenta con leyes y reglamentos que fomentan el uso de energías renovables y promueven el desarrollo de fuentes no convencionales de energía, incluyendo a la geotermia, mediante exoneración de impuestos de importación de materiales y equipos no producidos en el país, que son necesarios para la investigación y la producción de energías alternativas¹²³.

La regulación para el sector geotérmico es sin embargo escasa e incompleta. El uso del recurso geotérmico está contemplado y estimulado en varias leyes y reglamentos, pero a nivel de declaración de principios o de política deseable. Las actividades geotérmicas están reguladas de forma general en el contexto de la legislación del sector eléctrico¹²⁴, la cual prevé el otorgamiento de concesiones sin distinguir etapas de exploración y explotación. En lo particular, no existen normas que regulen los aspectos técnicos para la exploración y explotación de recursos geotérmicos.

El Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) es el ente rector con responsabilidad de definir las políticas y estrategias del sector eléctrico; el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC) actúa como regulador del sector eléctrico y es la autoridad que otorga

¹²⁰ SYR Geociencias S.A., subsidiaria en Ecuador de la canadiense SYR & Whistler Consulting Group. <http://www.syr-whistler.com/espanol/pagespa.html>.

¹²¹ Compañía General de Ingeniería y Sondeos (CGS), que opera en geotermia bajo un acuerdo de colaboración con el Instituto Volcánológico de Canarias (Involcán). Este estudio ha sido financiado con un fondo del BID, administrado por el Instituto Nacional de Pre-inversión (INP).

¹²² Iniciado como Plan Nacional de Desarrollo 2007-2010, luego Plan Nacional para el Buen Vivir 2009-2013 y actualmente Buen Vivir Plan Nacional 2013-2017. Documentos disponibles en: <http://buenvivir.gob.ec/versiones-plan-nacional>.

¹²³ Ley No. 86 de 1982. Ley de Fomento de Energías No Convencionales. Enmendada en 2010.

¹²⁴ Ley de Régimen del Sector Eléctrico. Publicada en el Registro Oficial Suplemento 43 del 10 de octubre de 1996. Enmendada en 2012. Reglamento de la Ley de Régimen del Sector Eléctrico, Decreto Ejecutivo 2066, Registro Oficial Suplemento 401 del 21 de noviembre de 2006. Documentos disponibles en: https://warrington.ufl.edu/centers/purc/docs/laws_energy_ecuador.pdf y <http://www.energia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/01/2.8-Reglamentos-Generales.pdf>.

permisos y concesiones¹²⁵ para proyectos de generación de electricidad; mientras que la empresa eléctrica nacional CELEC EP es la encargada de la gestión, ejecución y operación de la generación y transmisión eléctrica. Desde 2010, CELEC EP ha sido específicamente delegada por el MEER como entidad responsable para el desarrollo de los principales proyectos geotérmicos del país. CELEC EP ha consignado al interior de su organización la responsabilidad de manejar los proyectos geotérmicos en la Unidad de Negocios de generación térmica Termopichincha (CELEC EP, 2014).

3. Principales proyectos geotérmicos

En Ecuador, la cordillera de los Andes se compone por dos cadenas paralelas, respectivamente denominadas Cordillera Occidental y Cordillera Oriental o Real, separadas por un amplio valle interandino. Ambas cordilleras en su porción septentrional se caracterizan por extensa actividad volcánica cuaternaria, representada por más de 50 volcanes de los cuales por lo menos 20 han estado en actividad durante el Holoceno, mientras que en la porción meridional el volcanismo es más antiguo, de edad terciaria. Es importante considerar que en el territorio ecuatoriano existe una de las más altas concentraciones, a nivel mundial, de aparatos volcánicos diferenciados de edad cuaternaria a reciente, cuyos sistemas de alimentación originan importantes anomalías en el flujo del calor terrestre¹²⁶. El territorio de Ecuador incluye además al archipiélago de las Islas Galápagos, conformado por 15 escudos volcánicos basálticos (Beate y Urquizo, 2015). En todo el territorio nacional se han documentado 167 manantiales de aguas termales y minerales, ubicadas principalmente en el valle interandino y alrededor de los principales complejos volcánicos de la cordillera andina¹²⁷.

Ecuador cuenta con un buen nivel de reconocimiento de sus recursos geotérmicos. Éstos, se encuentran principalmente en la porción septentrional de la cordillera andina, en asociación con el volcanismo cuaternario, pero algunas zonas de interés han sido identificadas también en la porción centro-meridional de la cordillera y en las Islas Galápagos (mapa 9). Los estudios de reconocimiento geotérmico nacional efectuados a finales de los años '70 y las sucesivas investigaciones realizadas, aún si de manera intermitente, durante más de 35 años han llevado a la identificación y caracterización de varios prospectos geotérmicos, que se encuentran actualmente en fases de estudio variables entre el reconocimiento preliminar y la pre-factibilidad.

Según reportado por INER (2015) existen en Ecuador cuatro prospectos catalogados como recursos de alta entalpía (Tufiño - Chiles - Cerro Negro, Chacana, Chachimbiro y Chalupas) tres de media-baja entalpía (Chalpatán, Baños de Cuenca e Ilaló) y una serie de otros prospectos que todavía no cuentan con información suficiente como para ser catalogados. Parte de estos prospectos no catalogados ya cuentan con ciertos estudios de reconocimiento preliminar (Chimborazo, Oyacachi, Salinas de Bolívar, Cuicocha, Tungurahua, San Vicente, Portovelo) mientras que otros son solamente identificados por indicios vulcanológicos y por la presencia de fuentes termales (Cayambe, Pululahua, Guagua Pichincha, Imbabura, Mojanda, Iguán, Soche y Reventador). Se trata así de siete prospectos bien identificados, ocho en fase de reconocimiento y otros ocho con información muy preliminar, por un total de 23 áreas geotérmicas identificadas en el territorio continental del país, más un área en el territorio insular de las Galapagos (Alcedo) (mapa 9).

Entre los proyectos más avanzados, Tufiño - Chiles - Cerro Negro, Chachimbiro, Chacana y Chalpatán cuentan con estudios a nivel de pre-factibilidad, que en los primeros tres casos han proporcionado resultados favorables para la existencia de recursos aptos para la generación geotermo-eléctrica, mientras que en el caso de Chalpatán han determinado la existencia de un recurso de baja temperatura. Tufiño - Chiles - Cerro Negro, Chachimbiro y Chacana son por lo tanto los únicos

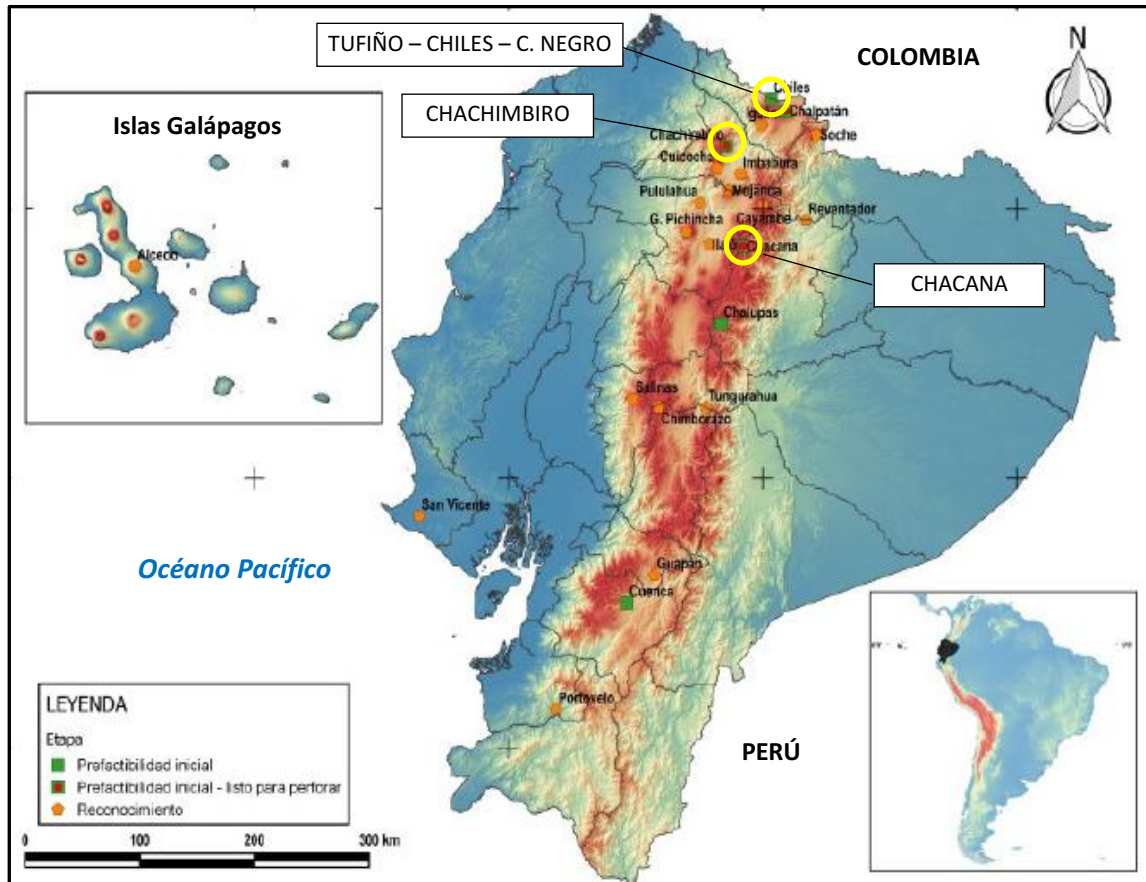
¹²⁵ El Reglamento de la Ley de Régimen del Sector Eléctrico otorga a CONELEC la facultad de autorizar concesiones para la actividad de generación mayor de 50 MW, y otorgar permisos para la construcción y operación de centrales de generación de 1 a 50 MW.

¹²⁶ Aguilera Ortiz E. <http://publicspe.espe.edu.ec/articulos/geologia/energia-geotermica/geotermica.htm>.

¹²⁷ <http://geo1.espe.edu.ec/volcanes-activos-ecuador/>; <http://www.volcanodiscovery.com/es/ecuador.html>.
<http://www.geologiaecuador.com/2011/04/aguas-termales-minerales-y-naturales-de.html>.

proyectos en el Ecuador que cuentan actualmente con claras perspectivas de desarrollo para generación de electricidad. Sus características principales se resumen en el cuadro 6 y se describen a continuación.

Mapa 9
Áreas geotérmicas de Ecuador y ubicación de los principales proyectos con perspectivas de desarrollo geotermo-eléctrico



Fuente: INER, 2015 (modificado).

Nota: Los límites y los nombres que figuran en este mapa no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

Cuadro 6
Áreas geotérmicas con perspectivas de desarrollo eléctrico de Ecuador

Provincia Geológica	Región administrativa	Área geotérmica	Nivel de estudio	Temperatura estimada / medida (°C)	Potencial reportado (MWe)
Cordillera occidental	Nariño/Carchi	Tufiño -Chiles ^a	Exploración superficie	230	138
	Imbabura	Chachimbiro	Exploración superficie	225-260	81
Cordillera oriental	Napo	Chacana	Exploración superficie	>180	52

Fuente: Elaboración propia.

^a Proyecto binacional ecuatoriano-colombiano.

La mayoría de las otras áreas geotérmicas están identificadas con base en datos geoquímicos y geo-vulcanológicos que, aún si en algunos casos son prometedores, no proporcionan un marco concluyente en cuanto a la efectiva existencia de recursos aptos para uso geotermo-eléctrico comercial. Un caso particular es representado por el prospecto de Alcedo, en las Islas Galápagos, donde existen importantes manifestaciones superficiales con datos geoquímicos y geológicos muy favorables para la existencia de un recurso geotérmico de alta temperatura, con capacidad estimada de

hasta 150 MWe, pero localizado en un contexto territorial que limita fuertemente sus posibilidades de desarrollo, debido a las características ambientales del área (Parque Nacional de las Galápagos), a la falta de infraestructura y a la escasez de demanda eléctrica (Beate y Urquizo, 2015). Por estas razones este proyecto no ha sido incluido en el Cuadro 6.

Tufiño-Chiles-Cerro Negro

Este prospecto geotérmico se encuentra en el norte de Ecuador en la frontera con Colombia (mapa 9) y es parte de un convenio binacional establecido entre ambos gobiernos en 2010 para el desarrollo conjunto del recurso. Por esta razón el proyecto ya ha sido descrito en el capítulo de Colombia, al cual se hace referencia para mayor información.

Chachimbiro

El prospecto de Chachimbiro se encuentra en la Cordillera Andina Occidental del norte de Ecuador, unos 50 km al sur del confín con Colombia, aproximadamente 70 km al norte de Quito y 17 km al noroeste de la ciudad de Ibarra (mapa 9). El área geotérmica se desarrolla entre los 2.800 y 4.000 m s.n.m. en el flanco oriental del complejo volcánico de Huanguillaro, sobre el borde de la Reserva Ecológica Cotacachi-Cayapas. La morfología es bastante abrupta, especialmente en las porciones intermedias de la ladera volcánica. Los estudios de pre-factibilidad del proyecto indicarían sin embargo que el sector de mayor interés para un posible desarrollo geotermo-eléctrico se concentra a elevaciones de 3.400-3.800 m s.n.m, en un sector morfológicamente más favorable y afuera del borde del área protegida. La zona es accesible mediante algunos caminos de tierra que alcanzan sectores con actividades agrícolas en la ladera volcánica. La línea de transmisión nacional en 138 kV con subestación en Ibarra, y también la línea de interconexión eléctrica en 230 kV entre Colombia y Ecuador pasan unos 25 km al este de la zona de interés geotérmico, por lo tanto las facilidades de conexión a la red eléctrica son bastante favorables.

El área se ha sido sede de actividad volcánica persistente desde el Pleistoceno (0,5 Ma), con formación de varios centros volcánicos que constituyen el extenso complejo de Huanguillaro o Chachimbiro (Cotacachi, Pilavo, Yanaurehu de Piñan y Cerro Negro, más varios centros menores y 17 domos ácidos). Los productos volcánicos más recientes están datados en 8.000 y 5.800 años. La evolución del complejo volcánico incluye también a un colapso gravitacional en su ladera oriental, con formación de extensas avalanchas de escombros. El flanco oriental del complejo volcánico, y en particular el sector afectado por el colapso gravitacional, se caracteriza por abundantes manifestaciones termales, varias de tipo clorurado alcalino, con temperaturas de hasta 61°C, las cuales son consideradas representar la descarga en superficie de un sistema geotérmico con temperaturas estimadas entre los 225°C y los 260°C (Aguilera, 1998; Aguilera 2005; Gherardi y Spycher, 2014; Beate y Urquizo, 2015).

El prospecto de Chachimbiro fue identificado como área geotérmica de interés prioritario ya durante los primeros estudios de reconocimiento geotérmico llevados a cabo en Ecuador a finales de los años '70 y principios de los '80, y luego ha sido investigado en varias ocasiones durante los años '80 y '90, con importantes contribuciones en la interpretación geoquímica realizadas mediante cooperación técnica de la OIEA. Todos estos estudios no superaron sin embargo la fase de reconocimiento con investigaciones geológicas y geoquímicas.

El Plan de Desarrollo de Recursos Geotérmicos preparado por el MEER en 2010 reconfirmó el interés prioritario de Chachimbiro, por lo cual el proyecto se volvió en un objetivo de particular interés para los programas geotérmicos del país y fue incluido en las iniciativas de CELEC EP. A continuación (en 2011), CELEC EP completó el estudio de pre-factibilidad del proyecto mediante contratación de la empresa consultora SYR. El estudio incluyó un programa completo de investigaciones de superficie, con revisión y actualización de los datos geológicos y geoquímicos, la ejecución de estudios geofísicos (MT, gravimetría, magnetometría y microsismicidad) y concluyó con la modelación conceptual del recurso y recomendaciones para las actividades de perforación exploratoria (Beate y Urquizo, 2015).

Los resultados del estudio de SYR (resumidos en Beate y Urquizo, 2015) indican que el prospecto de Chachimbiro presenta elementos favorables para la existencia de un recurso geotérmico de alta temperatura, pero con rasgos geoquímicos y geofísicos complejos, que no permiten una interpretación unívoca del modelo del recurso. De hecho, el estudio propone diferentes alternativas de modelo, lo cual conlleva una condición de alto riesgo en la sucesiva fase de perforación exploratoria. Los principales elementos de riesgo son asociados con la temperatura y la permeabilidad, mientras que la química de los fluidos parece constituir un riesgo menor. La dificultad en la interpretación del modelo del recurso se refleja también en la estimación de su potencial, que según SYR puede variar entre 13 y 178 MWe, con un valor promedio de 81 MWe¹²⁸. Una estimación anterior, realizada por INECEL en 1990 aplicando el método volumétrico-estadístico había proporcionado un valor algo similar, de 113 MWe¹²⁹.

Según reportado por Beate y Urquizo (2015) CELEC EP está actualmente preparando la documentación necesaria para proceder con la ejecución de perforaciones exploratorias profundas. El Gobierno de Japón ha mostrado interés en financiar el estudio de factibilidad del proyecto y en septiembre de 2015 ha dado formalmente inicio a un programa de cooperación técnica no reembolsable, a través de JICA, para el desarrollo de una planta geotérmica de 50 MWe en Chachimbiro¹³⁰.

Chacana

El área geotérmica de Chacana, que en efecto comprende diferentes zonas termales, y en literatura ha sido a veces reportada con el nombre de sectores más específicos (Cachiyacu, Jamanco, Papallacta, Oyacachi), se encuentra en el norte de Ecuador, en la cresta de la Cordillera Real, unos 65 km al este de Quito s.n.m. (mapa 9). Las zonas de mayor interés geotérmico se concentran en el sector meridional de la Caldera Chacana, a elevaciones variables entre 3.200 y 4.000 m s.n.m., en un territorio con topografía irregular cubierto de pastizales y algunos parches de bosque, con clima húmedo y frío durante la mayoría del año. Buena parte del sector de interés geotérmico se encuentra en zonas de elevada sensibilidad ambiental, al interior de las Reservas Ecológicas Antisana y Cayambe-Coca. De hecho, es un sector muy poco poblado y con caminos de acceso limitados, aunque cercano a los poblados de El Tambo y Papallacta, que se ubican a lo largo de una importante vía de comunicación pavimentada que comunica Quito con la región amazónica. La red de transmisión eléctrica nacional en 138 kV pasa por la porción meridional del área.

El prospecto geotérmico se ubica al interior de la enorme depresión de la Caldera Chacana (32 x 18-24 km), e inmediatamente al norte del imponente cono volcánico de Antisana. La Caldera Chacana es parte de un gran complejo volcánico de edad Plio-Cuaternaria, formado por varios ciclos de vulcanismo explosivo y efusivo, de composición andesítica a riolítica, que se desarrollaron en el transcurso de los últimos 2,7 Ma. La actividad más reciente está representada por grandes erupciones explosivas ocurridas entre 240.000 y 160.000 años, luego por flujos y numerosos domos de lavas dacíticas que surgieron de fisuras al interior de la caldera durante los últimos 30.000 años. Los productos más recientes son representados por coladas de lava históricas, formadas en 1760-1773¹³¹.

La zona de mayor interés geotérmico corresponde a la porción meridional de la Caldera Chacana y está representada por tres complejos de fuentes termales y zonas de alteración hidrotermal, conocidos como Cachiyacu (max. 72°C), Jamanco (max. 63°C) y Termas de Papallacta (max. 58°C) (Beate y Urquizo, 2015).

Las zonas termales en la Caldera de Chacana fueron inicialmente estudiadas durante los primeros reconocimientos geotérmicos realizados en Ecuador a finales de los años '70 y principios de los '80, pero sin ser consideradas prospectos de elevado interés. El área fue luego re-valorizada en 2005,

¹²⁸ Basado en análisis probabilística del método de densidad de potencia, utilizando valores variables entre 10 y 20 MWe/km².

¹²⁹ Dato reportado por Aguilera Ortiz E. en: <http://publiespe.espe.edu.ec/articulos/geologia/energia-geotermica/geotermica.htm>.

¹³⁰ <https://www.celec.gob.ec/termopichincha/index.php/noticias-termopichincha/267-inicio-de-cooperacion-tecnica-no-reembolsable-entre-el-ecuador-y-japon-para-impulsar-el-desarrollo-geotermico-en-el-pais>.

¹³¹ <http://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=352022>.

en una publicación sobre los prospectos geotérmicos de Ecuador (Beate y Salgado, 2005), lo cual generó interés por parte de la empresa eléctrica nacional (Electroguayas, luego CELEC EP) que promovió la ejecución de estudios geológicos y geoquímicos adicionales. Los resultados fueron considerados prometedores, particularmente para el sector de Cachiayacu (Beate y Salgado, 2010; Beate et al., 2010).

Sucesivamente, el Plan de Desarrollo de Recursos Geotérmicos preparado por el MEER en 2010 incluyó a la zona de Chacana entre los prospectos de mayor interés, así que fue incluida entre las iniciativas de CELEC EP. A continuación, CELEC EP encargó a la empresa consultora SYR la ejecución de un estudio de pre-factibilidad, que fue realizado entre 2011 y 2012. Dicho estudio, incluyó un programa completo de investigaciones de superficie, con revisión y actualización de los datos geológicos y geoquímicos, la ejecución de estudios geofísicos (MT, gravimetría, magnetometría y microsismicidad) y concluyó con la modelación conceptual del recurso y recomendaciones para la perforación exploratoria (Beate y Urquizo, 2015).

Los resultados del estudio de SYR (resumidos en Beate y Urquizo, 2015) indican que la porción meridional de la Caldera Chacana, que abarca a las zonas termales de Cachiayacu, Jamanco y Termas de Papallacta, contiene muy probablemente diferentes sistemas geotermales, identificados en cuatro áreas de interés denominadas Cachiayacu, Jamanco, Chimbaureu y Plaza de Armas. El quimismo de las aguas termales es de tipo clorurado neutro, consistente con fluidos geotérmicos profundos, pero el conjunto de datos geoquímicos define un marco complejo que no sustenta una interpretación unívoca y la presencia de un único sistema hidrotermal. El mejor escenario propuesto por SYR considera la existencia de sistemas geotérmicos separados, con temperatura de aproximadamente 230°C en Cachiayacu y de 140-180°C en Jamanco. Modelos alternativos consideran la posibilidad de sistemas en fase de enfriamiento, con temperaturas sub-económicas, o inmaduros y restringidos a circulación de fluidos en zonas de falla. Para las áreas de Cachiayacu y Jamanco, que cuentan con un nivel más avanzado de información, SYR efectuó una estimación de potencial bajo el escenario más promisorio¹³² obteniendo indicaciones de recursos de tamaño modesto, en el rango de 3,3 a 26 MWe con una media de 13 MWe para Jamanco, y en el rango de 7,6 a 83 MWe, con una media de 39 MWe para Cachiayacu.

Según reportado por Beate y Urquizo (2015) CELEC EP está planificando pasar a una fase de pre-factibilidad avanzada, según recomendado por SYR, perforando dos pozos de diámetro reducido, respectivamente con profundidad de 900 m en Jamanco y 600 m en Cachiayacu, para continuar luego con perforaciones exploratorias de diámetro comercial si los resultados fueran alentadores. El Gobierno de Japón ha mostrado interés en apoyar con un programa de cooperación técnica no reembolsable, a través de JICA, para la supervisión del proyecto de pre-factibilidad avanzada en Chacana¹³³.

4. Potencial geotermo-eléctrico

Existen diferentes estimaciones del potencial geotermo-eléctrico de Ecuador, en un rango muy amplio, variable entre 500 y 8.000 MWe.

Las primeras estimaciones fueron efectuadas por INECEL a principios de los años '90 aplicando el método volumétrico-estadístico a los prospectos de Tufiño-Chiles, Chachimbiro y Chalupas, que en ese entonces contaban con mayor información y eran considerados los más promisorios para un potencial desarrollo. Los resultados proporcionaron respectivamente valores de 139, 113 y 282 MWe, por un total de 534 MWe¹³⁴.

Una evaluación del potencial a nivel nacional fue luego realizada por Gawell et al. (1999), estimando un valor entre 420 y 850 MWe, que podría sin embargo aumentar hasta los 1.700 MWe en condiciones de desarrollo tecnológico más avanzado, no mejor especificado.

¹³² Basado en análisis probabilística del método de densidad de potencia, utilizando valores variables entre 10 y 20 MWe/km².

¹³³ <https://www.celec.gob.ec/termopichincha/index.php/retos-empresariales/proyecto-geotermico/firma-del-convenio>.

¹³⁴ Datos reportados por Aguilera Ortiz E. <http://publiespe.espe.edu.ec/articulos/geologia/energia-geotermica/geotermica.htm>.

En el mismo período (1999-2000), CEPAL, considerando los datos disponibles y las efectivas perspectivas de desarrollo de los diferentes prospectos identificados, propuso un valor de 500 MWe¹³⁵.

Estimaciones más recientes efectuadas por el MEER en 2010, en el ámbito de la planificación del desarrollo geotérmico de Ecuador, fueron basadas sobre el criterio empírico propuesto por Stefansson (2005), que relaciona el número de volcanes activos en una determinada región con el potencial geotermo-eléctrico. Los resultados llevaron a considerar que en el arco volcánico de Ecuador el potencial podría alcanzar los 3.000 MWe y ser inclusive mucho mayor, hasta 8.000 MWe, si se considera el volcanismo riolítico de las grandes calderas de Chalupas y Chacana (Beate, 2010 - reportado en Lloret y Labus, 2014).

5. Situación actual y perspectivas de desarrollo

El sector eléctrico de Ecuador está en gran parte controlado por el Estado. La empresa estatal CELEC EP, está a cargo del 75% de la generación eléctrica en el país, así como de la transmisión y distribución¹³⁶. Los permisos y concesiones para generación de electricidad son otorgados por el ente regulador CONELEC, sin embargo, la participación privada en la generación de electricidad puede darse solamente bajo ciertas circunstancias, específicamente reguladas por CONELEC, en las cuales el Gobierno puede delegar ciertas funciones a entidades privadas.

La legislación de Ecuador cuenta con leyes y reglamentos con incentivos que fomentan el uso de fuentes no convencionales de energía, incluyendo a la geotermia. La regulación para el sector geotermo-eléctrico es sin embargo escasa e incompleta, no existen normas que regulen los aspectos técnicos para la exploración y explotación de recursos geotérmicos, y los permisos o concesiones que aplican a la generación geotermo-eléctrica no contemplan las etapas de exploración y explotación, que son típicas de un proyecto de desarrollo geotérmico. Todas estas condiciones definen un contexto con significativas limitaciones para impulsar un sector geotérmico eficiente y capaz de atraer las inversiones necesarias para desarrollos significativos.

El territorio de Ecuador comprende un amplio tramo de la cordillera volcánica cuaternaria andina, lo cual le confiere interesantes perspectivas de contener significativos recursos geotérmicos de alta temperatura. El país cuenta con un reconocimiento bastante avanzado del recurso geotérmico, derivado de varios estudios realizados en el transcurso de los últimos 35 años. En 2010 el MEER elaboró un plan nacional para impulsar el desarrollo de recursos geotérmicos para generación de electricidad, el cual identificó y clasificó a los principales prospectos conocidos en el país (Chachimbiro, Chalpatán, Chacana-Jamanco, Chalupas, Guapán, Chacana-Cachiyacu, Tufiño, Chimborazo, Chacana-Oyacachi, Baños de Cuenca y Alcedo). Consistentemente con la política energética nacional, el ente rector del sector energético (MEER) encargó la investigación y desarrollo de los principales proyectos geotérmicos a la empresa eléctrica nacional CELEC EP, la cual es actualmente la principal entidad con operaciones en el sector geotérmico, en conjunto con el INER que se dedica a proyectos de investigación científica y tecnológica en el campo de las energías renovables.

En el transcurso de los últimos cinco años CELEC EP, a través de su subsidiaria Termopichincha, ha tomado iniciativa en los proyectos considerados más prometedores, llevando a cabo estudios de pre-factibilidad en Chachimbiro y Chacana y reactivando la exploración del proyecto binacional Tufiño - Chiles - Cerro Negro en asociación con ISAGEN de Colombia. Otros estudios han sido efectuados por CELEC EP con la colaboración del INER en los prospectos de media-baja entalpía de Chalpatán y Baños de Cuenca.

Los resultados obtenidos son particularmente prometedores en Chachimbiro y en un sector de Chacana (Cachiyacu), donde CELEC EP está planificando pasar a una fase de pre-factibilidad

¹³⁵ <http://www.espe.edu.ec/portal/portal/main.do?jsessionid=13B9F779C6F0B9C07AF3CA2DB516FFBD?sectionCode=996>.

¹³⁶ <https://www.celec.gob.ec/capacidad-instalada/generacion.html>.

avanzada mediante la perforación de pozos exploratorios de diámetro reducido. En Chalpatán los estudios de superficie han concluido con la interpretación de un recurso de baja temperatura, no apto para uso eléctrico. En Tufiño - Chiles - Cerro Negro el estudio de pre-factibilidad ha tenido atrasos, en parte debido a oposición social en el lado colombiano, y está actualmente en fase de ejecución en el lado ecuatoriano. En Baños de Cuenca fueron efectuados solamente estudios preliminares que confirmaron expectativas de un recurso de baja temperatura.

El Gobierno de Ecuador ha recientemente recibido apoyo del Gobierno de Japón, a través de con un convenio de cooperación técnica no reembolsable de JICA, para la supervisión de los proyectos de pre-factibilidad avanzada en Chachimbiro y Chacana¹³⁷. Adicionalmente, en septiembre de 2015 JICA ha dado formalmente inicio a un programa de cooperación técnica no reembolsable, para el desarrollo de una planta geotérmica de 50 MWe en Chachimbiro¹³⁸.

Chachimbiro y Chacana-Cachiyacu constituyen por lo tanto los proyectos geotérmicos con perspectivas de desarrollo para generación de electricidad actualmente más avanzados y con planes concretos para pasar a una fase de perforación exploratoria. El proyecto binacional Tufiño - Chiles - Cerro Negro cuenta también con interesantes indicios de contener un recurso de alta temperatura, que se espera sean ulteriormente confirmados por el estudio de pre-factibilidad en curso, sin embargo se encuentra en un contexto territorial, ambiental y social algo complejo que está determinando mayores retos para su implementación.

F. Perú

1. Reseña histórica de la investigación geotérmica

El primer inventario de aguas minerales del Perú fue efectuado en 1973 por el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) (Zapata, 1973). Los primeros estudios geotérmicos iniciaron en la segunda mitad de los años '70 con algunas actividades en el Sur de Perú. En 1975 MineroPerú realizó evaluaciones preliminares de manifestaciones geotérmicas en las zonas de Calacoa y Salinas, en el Departamento de Moquegua. En 1976 Geothermal Energy Research de Japón efectuó trabajos de exploración en la cuenca de Vilcanota, en el Departamento del Cuzco. En 1977 el INIE realizó el primer censo nacional de manifestaciones geotermales (Verastegui, 1988; Fidel, 2008; Cruz y Vargas, 2015).

En 1978 el INGEMMET enfocó mayormente la atención sobre el recurso geotermal actualizando el inventario nacional y subdividiendo el país en seis regiones geotérmicas principales. Sucesivamente las investigaciones continuaron con la ayuda de diferentes organismos internacionales. Entre 1979 y 1980, con el apoyo de OLADE, la investigación geotérmica fue concentrada en la cordillera volcánica del sur de Perú, mediante estudios de reconocimiento llevados a cabo por la empresa italiana Aquater, en colaboración con el INGEMMET. En 1980 también la empresa Geothermal Energy Systems Ltd efectuó estudios en el sur de Perú, en las zonas de Calacoa, Salinas Grandes y Tutupaca. Entre 1982 y 1986 el reconocimiento geotérmico nacional fue extendido a la región noroeste del Perú, mediante un convenio de cooperación con el Gobierno de Italia, ejecutado por la generadora estatal ElectroPerú con la participación de la empresa italiana CESEN. Paralelamente, entre 1983 y 1985, el INGEMMET amplió la investigación geotérmica nacional a la región de Puno-Cuzco, con el apoyo del Servicio Geológico Británico (Verastegui, 1988; Fidel, 2008; Cruz y Vargas, 2015).

Durante la segunda mitad de los años '80 y los '90 la investigación geotérmica continuó principalmente enfocada en la cordillera volcánica del sur del Perú, donde los estudios anteriores

¹³⁷ <https://www.celec.gob.ec/termopichincha/index.php/retos-empresariales/proyecto-geotermico/firma-del-convenio>.

¹³⁸ <https://www.celec.gob.ec/termopichincha/index.php/noticias-termopichincha/267-inicio-de-cooperacion-tecnica-no-reembolsable-entre-el-ecuador-y-japon-para-impulsar-el-desarrollo-geotermico-en-el-pais>.

habían identificado los prospectos geotérmicos más prometedores. Los nuevos estudios fueron en parte realizados de forma independiente por el INGEMMET, ElectroPerú (CENERGIA a partir de 1993¹³⁹), y el Proyecto Especial Tacna del Gobierno Regional de Tacna, y en parte con el apoyo de organismos internacionales como: la OIEA en 1986, la CEPAL en 1997, Sandia National Laboratories en 1998, y el Instituto de Investigaciones Eléctricas de México (IIE) en 1996-1999. Estas actividades investigaron principalmente el sector comprendido entre los volcanes Tutupaca y Casiri en la Región de Tacna, y el Valle del Colca en la Región de Arequipa, pero el nivel de los estudios prácticamente no pasó del reconocimiento geológico y geoquímico (Battocletti y Lawrence, 1999; Fidel, 2008).

Entre 1997 y 2003 el INGEMMET realizó un nuevo inventario nacional, con caracterización detallada de 537 manifestaciones termales y minerales, cuyos resultados fueron publicados en seis Boletines de la institución¹⁴⁰. Luego, con toda la información recolectada durante más de 30 años de investigaciones, y por encargo del Ministerio de Energía y Minas (MINEM), en el 2006 el INGEMMET inició a trabajar en un “Proyecto de Evaluación del Potencial Geotérmico del Perú”¹⁴¹ el cual produjo inicialmente un nuevo mapa geotérmico, publicado en el 2010 (Fidel, 2008; Vargas y Cruz, 2010, Vega, 2013 - ver Mapa 10-A).

A partir del 2007 el programa geotérmico de INGEMMET recibió apoyo del Gobierno del Japón. En 2007-2008, mediante la asistencia del Banco de Cooperación Internacional del Japón (JBIC), la atención fue concentrada en las áreas geotérmicas de Borateras y Calientes, en la cordillera volcánica del sur de Perú, donde la empresa japonesa West-Jec, en colaboración con el INGEMMET, llevó a cabo un programa de investigaciones geológicas, geoquímicas y geofísicas a nivel de pre-factibilidad. Luego, en diciembre del 2009 el MINEM suscribió un acuerdo de cooperación técnica con JICA para la ejecución de estudios finalizados a la preparación de un “Plan Maestro para el Desarrollo de la Energía Geotérmica en el Perú”. El Plan Maestro fue completado en el 2012. Entre sus principales contenidos se encuentra una base de datos con recopilación de información sobre el recurso geotérmico a nivel nacional, la evaluación del potencial del recurso y la definición de una hoja de ruta para el desarrollo de la energía geotérmica en el país (Fidel, 2008; MINEM-JICA, 2012; Vega, 2013).

A partir de 2010, y paralelamente a la ejecución del Plan Maestro, la emisión de un nuevo reglamento de la Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos, movilizó a varias empresas privadas interesadas en explorar recursos geotérmicos en el país. Entre 2010 y 2012 el MINEM recibió numerosas solicitudes de autorización de exploración, muchas de las cuales correspondientes a lotes parcialmente sobrepuestos, de diferentes empresas en competición para áreas de particular interés geotérmico. El MINEM llegó a otorgar hasta 32 autorizaciones de exploración a 6 diferentes empresas, nacionales y extranjeras, pero el desarrollo geotérmico no ha tenido un avance sustancial y las autorizaciones vigentes se redujeron a 20 a finales del 2015 (Claros, 2014; Claros, 2015). La mayoría de las empresas no ha avanzado significativamente con los programas de exploración, en parte por falta de financiamiento y en parte por otros problemas, como han sido: aspectos regulatorios y administrativos, restricciones ambientales, temas sociales, y más en general la débil articulación entre los actores clave del sector (Muñoz et al., 2014; Vega, 2015).

2. Marco legal

En los últimos 20 años el sector eléctrico en el Perú ha ido desarrollando cambios significativos en su estructura, que lo han transformado en un campo atractivo y propicio para la inversión privada, basado en un sistema regulatorio estable, bien estructurado y dotado de incentivos para la promoción de inversiones.

¹³⁹ Con la privatización de ElectroPerú en 1993, el Centro de Conservación de Energía y del Ambiente (CENERGIA) asumió todos los programas nacionales de energía renovable, incluyendo a la geotermia.

¹⁴⁰ Boletín No. 18, de Mayo 1997; Boletín No. 19 de Enero 1998; Boletín No 21 de Agosto 1999; Boletín No. 22 de Junio 2000; Boletín No. 24 de Mayo 2001; Boletín No. 25 de Febrero 2003.

¹⁴¹ Proyecto GA-21, a cargo de la Dirección de Geología Ambiental y riesgo Geológico de INGEMMET.

Perú ha sido el primer país en América Latina en introducir una ley específica para promover el desarrollo racional de la geotermia e incentivar la intervención privada en el sector, mediante promulgación de La Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos en julio de 1997¹⁴². Sin embargo, la reglamentación de la Ley no se concretó hasta diez años después, a finales del 2006¹⁴³. El Reglamento resultó ser un instrumento con ciertas debilidades y fue repetidamente modificado: en 2008 incluyendo normas para facilitar la actividad promotora de exploración geotérmica por parte de entidades públicas especializadas¹⁴⁴, y en 2009 para precisar aspectos relacionados con la administración de los procesos de autorización de exploración y concesión de explotación¹⁴⁵. En 2010 el instrumento regulatorio de la actividad geotérmica fue puesto nuevamente en discusión, derogando todas las normas emitidas en 2006 y sucesivamente modificadas, para decretar un nuevo Reglamento de la Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos¹⁴⁶. Éste sigue vigente a la fecha, y la experiencia madurada con su aplicación durante los últimos cinco años ha evidenciado que se trata todavía de un instrumento en fase de adaptación, que aún necesita ciertos ajustes para conformarse a las necesidades operativas de la industria geotérmica en el país. La situación ha ido sin embargo progresivamente mejorando y una modificación de particular importancia para subsanar un problema de ambigüedad entre los plazos de inicio de las autorizaciones de exploración y la obtención de permisos ambientales fue decretada en el 2013¹⁴⁷ (Muñoz et al., 2014).

Además del marco legal específico para la geotermia, el Perú cuenta con instrumentos legales que incentivan el desarrollo de las energías renovables, en particular el Decreto Legislativo de Promoción de la Inversión para la Generación de Electricidad con el Uso de Energías Renovables¹⁴⁸, cuyos beneficios aplican también a la generación geotérmica. El marco legal de las energías renovables implementa un sistema cuya finalidad es promover la inversión a través de una serie de incentivos y beneficios, como son: el establecimiento de un porcentaje del consumo eléctrico nacional que debe ser suplido por fuentes de generación renovables¹⁴⁹, la asignación de contratos para la generación con energías renovables mediante subastas públicas con precios garantizados, prioridad de despacho y beneficios fiscales.

3. Principales proyectos geotérmicos

El territorio de Perú ha sido subdividido por el INGEMMET en seis amplias regiones geotérmicas, en las cuales han sido identificadas más de 500 manifestaciones termales (mapa 10). La cordillera volcánica del sur del Perú, definida por INGEMMET “Eje Volcánico Sur”, es la región más promisoría por sus recursos geotérmicos de alta temperatura asociados con el volcanismo cuaternario. En esta zona se encuentran 16 centros volcánicos principales de edad holocena, varios de ellos activos, muchos de los cuales presentan manifestaciones termales de alta temperatura en sus laderas y áreas adyacentes.

¹⁴² Ley No. 26848. Aprueban la Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos. El Peruano, 29 de Julio, 1997.

¹⁴³ Decreto Supremo No. 072-06-EM. Reglamento de la Ley N° 26.848, Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos. El Peruano, 23 de Diciembre, 2006.

¹⁴⁴ Decreto Supremo No. 016-2008-EM. Dictan normas para facilitar actividad promotora de exploración geotérmica por parte de entidades públicas especializadas. El Peruano, 15 de Marzo, 2008.

¹⁴⁵ Decreto Supremo No. 009-2009-EM. Modifican Reglamento de la Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos. El Peruano, 3 de Febrero, 2009.

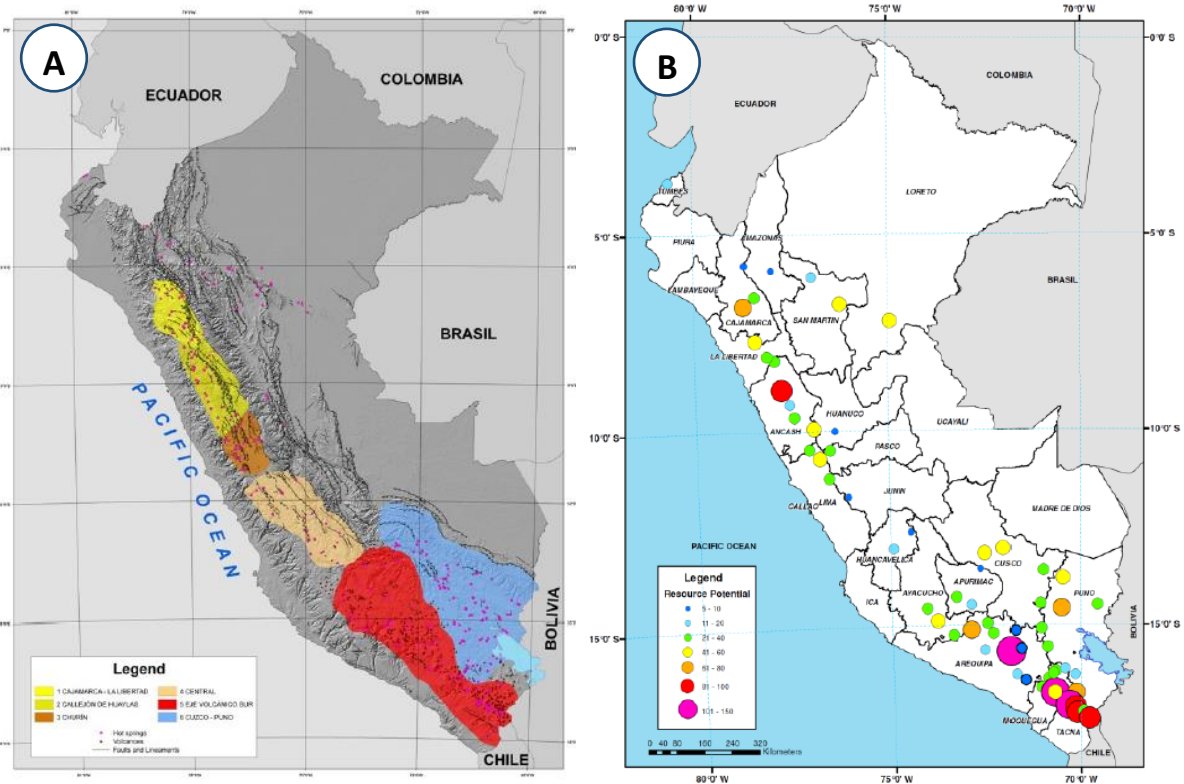
¹⁴⁶ Decreto Supremo No. 019-2010-EM. Reglamento de la Ley N° 26.848, Ley orgánica de recursos geotérmicos. El Peruano, 8 de Abril, 2010.

¹⁴⁷ Decreto Supremo No. 015-2013-EM. Modifican el Reglamento de la Ley No. 26848. Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos. El Peruano, 25 de Mayo, 2013.

¹⁴⁸ Decreto Legislativo No. 1002. Decreto Legislativo de Promoción de la Inversión para la Generación de Electricidad con el Uso de Energías Renovables. El Peruano, 2 de Mayo, 2008.

¹⁴⁹ El porcentaje es fijado cada 5 años. Actualmente es el 6% (excluyendo hidroeléctrica) hasta 2018 (IRENA, 2015b).

Mapa 10
Regiones geotérmicas del Perú potencial geotérmico del Perú



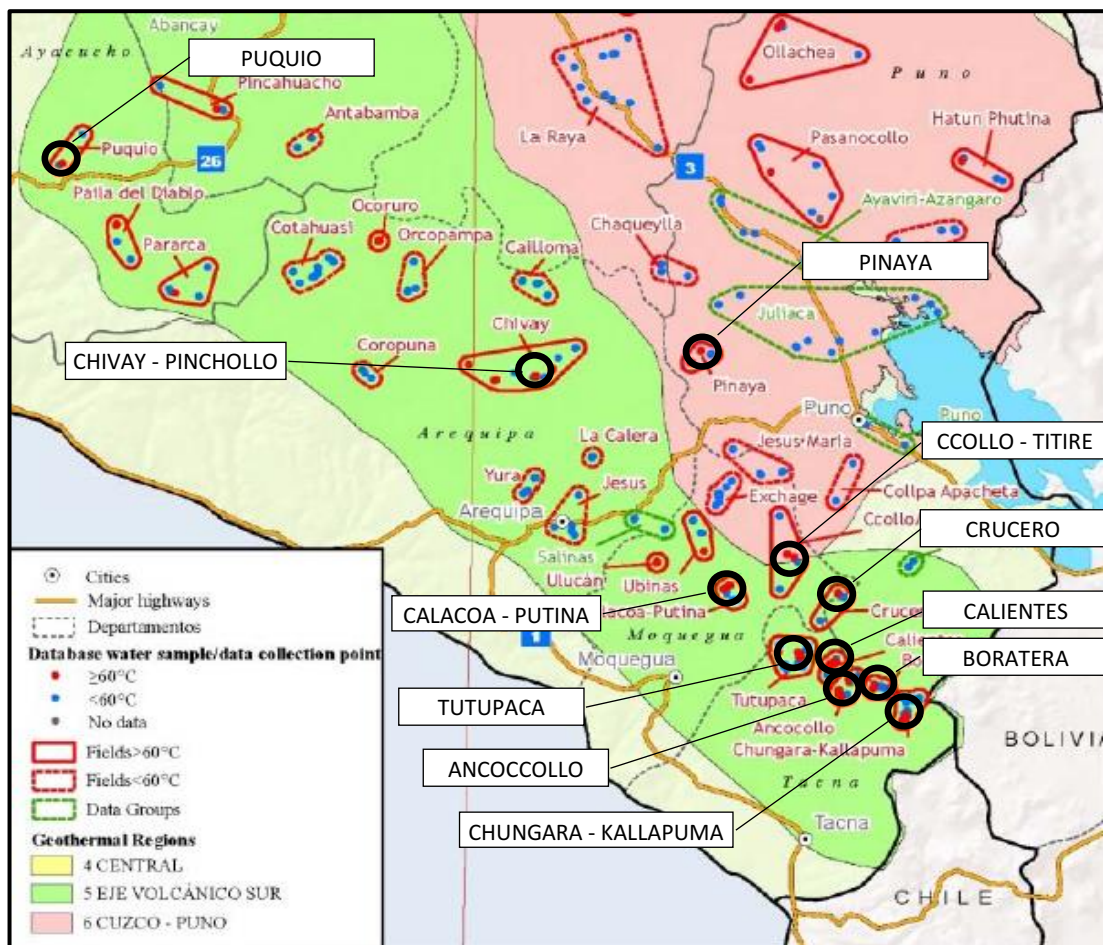
Fuente: Mapa A - Vargas y Cruz, 2010; Mapa B - MINEM-JICA, 2012.

Nota: Los límites y los nombres que figuran en este mapa no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

El Plan Maestro para el Desarrollo de la Energía Geotérmica completado en 2012 por MINEM-JICA provee la información más detallada disponible en cuanto a perspectivas de explotación del recurso geotérmico en el Perú. El estudio identificó 61 campos geotérmicos potenciales, cuatro de los cuales (Tutupaca, Calientes, Boratera, Ancocollo) están caracterizados mediante estudios de superficie avanzados (geología, geoquímica y geofísica), 11 cuentan con estudios de reconocimiento geológico y geoquímico básicos, y otros 46 están identificados esencialmente por interpretación de características y distribución de manifestaciones termales. Con base en los datos proporcionados por MINEM-JICA (2012), más otras informaciones disponibles en literatura, y según el criterio de los autores del presente documento, las áreas geotérmicas más promisorias para desarrollos geotermo-eléctricos, serían las once que se indican en el mapa 11 y en el cuadro 7¹⁵⁰.

¹⁵⁰ Para fines de esta evaluación se seleccionaron los proyectos categorizados por MEM-JICA (2012) con temperatura estimada del recurso superior a los 180°C, potencial estimado superior a los 30 MWe. La selección está además sustentada en el conocimiento personal de los autores.

Mapa 11
Áreas geotérmicas de Perú y ubicación de los principales proyectos con perspectivas de desarrollo geotermo-eléctrico



Fuente: Claros, 2015 (modificado).

Nota: Los límites y los nombres que figuran en este mapa no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

Cuadro 7
Áreas geotérmicas con perspectivas de desarrollo eléctrico de Perú

Región geotérmica	Región administrativa	Área geotérmica	Nivel de estudio	Temperatura geoquímica (°C)	Potencial reportado (MWe)
	Tacna	Tutupaca		215	114
	Tacna	Calientes	Exploración	219	100
	Tacna	Borateras	Superficie	223	40
	Tacna	Ancoccollo		219	98
Eje volcánico sur	Ayacucho	Puquio		210	34
	Arequipa	Chivay - Pinchollo		208	163
	Moquegua	Calacoa - Putina		186-240	108
	Moquegua	Collo - Titire	Reconocimiento	217	40
	Moquegua-Puno	Crucero		216	80
	Tacna	Chungara - Kallapuma		210	84
Cuzco-Puno	Puno	Pinaya		193	37

Fuente: Elaboración propia.

La mayoría de las áreas seleccionadas se encuentra en el borde occidental del altiplano del sur de Perú a elevaciones superiores a los 4.000 m s.n.m., por lo cual se caracterizan por condiciones territoriales y ambientales muy similares. Se trata de sitios rurales generalmente ubicados en sectores remotos, pero fácilmente accesibles mediante carreteras pavimentadas que cruzan el altiplano y caminos secundarios, generalmente en buenas condiciones. Todas las áreas se encuentran en territorios de comunidades indígenas Aymara o Quechua.

Las principales características de cada área geotérmica, tanto por lo que se refiere al recurso (estudios realizados, manifestaciones termales, interpretaciones geotermométricas, potencial estimado) como por sus aspectos logísticos y ambientales, están reportadas en el Plan Maestro para el Desarrollo de la Energía Geotérmica (MINEM-JICA, 2012), al cual se hace referencia para mayor información, mientras que a continuación se resumen los aspectos más relevantes.

Puquio

El prospecto geotermal de Puquio se encuentra en la extremidad noroeste de la región geotérmica del Eje Volcánico Sur (mapa 11), unos 15 km al noreste de la ciudad de Puquio, desde la cual es fácilmente accesible mediante la carretera nacional A-32, que cruza la totalidad del área de mayor interés geotérmico. La zona se caracteriza por un amplio valle a elevaciones entre 3.900 y 4.200 m s.n.m., en el cual se encuentran algunos grupos de manantiales termales que descargan aguas cloruradas con temperatura de hasta 80°C. El sector se caracteriza por una amplia extensión de productos volcánicos cenozoicos, pero está alejado de centros volcánicos recientes¹⁵¹, por lo cual se considera que contenga un sistema geotermal de tipo tectónico, asociado con circulación profunda a lo largo de fallas.

El área termal de Puquio fue inicialmente identificada y caracterizada en el inventario de manifestaciones termales del Perú (Steinmuller y Núñez, 1998), y luego confirmada como área de interés geotérmico en el Plan Maestro de MINEM-JICA (2012), mediante la ejecución de estudios adicionales de reconocimiento geológico y geoquímico. Los resultados de dichos estudios definen condiciones favorables para la existencia de un recurso geotérmico con temperatura alrededor de los 210°C, y con un potencial estimado en 34 MWe mediante el método volumétrico-estadístico (MINEM-JICA, 2012).

El prospecto geotérmico de Puquio es actualmente controlado por la empresa Eco Energy SAC¹⁵², la cual recibió en 2011 dos autorizaciones de exploración denominadas Geronta I y Geronta II, que en su conjunto cubren el sector principal con manifestaciones termales. El plazo de dichas autorizaciones inició en mayo del 2014 y vence en mayo del 2017. La empresa Enel Green Power Perú S.A.¹⁵³ controla un sector marginal del área, adyacente al noreste de las autorizaciones de Eco Energy, mediante la autorización de exploración Carmen, otorgada en 2013 (Claros, 2015). No se conoce de investigaciones más avanzadas que puedan haber realizado ambas empresas en la zona, pero aparentemente no han efectuado actividades más allá de reconocimientos geológicos y geoquímicos preliminares.

La zona de Puquio se encuentra alejada del sistema principal de transmisión eléctrica. Según reportado por MINEM-JICA (2012) el punto de conexión más cercano al sistema de alta tensión es la subestación de Cotaruse (220 kV), ubicada 113 km al este. En Puquio, a 15 km de la zona geotérmica, se encuentra una subestación conectada al sistema principal mediante línea de transmisión de 60 kV.

Chivay-Pinchollo

La zona geotérmica denominada Chivay por MINEM-JICA (2012) abarca un amplio grupo de manifestaciones termales localizado en el Valle del Colca, unos 100 km al noroeste de la ciudad de Arequipa (mapa 11). Parte de las manifestaciones son constituidas por grupos de fuentes termales distribuidos en el fondo del valle (Chivay, Yanque, Paccla, con temperaturas de hasta 80-93°C, entre otras menores), mientras que otra parte constituye un amplio sector termal, en la ladera meridional del valle, denominado Pinchollo.

¹⁵¹ El Volcán Sara Sara, último complejo cuaternario en la extremidad noroeste del arco volcánico del sur de Perú e encuentra unos 100 km al sureste de Puquio.

¹⁵² Compañía registrada en Perú, de capital norteamericano y canadiense.

¹⁵³ Empresa subsidiaria en Perú de la empresa de energías renovables italiana Enel Green Power, parte del Grupo Enel.

La zona geotérmica de Pinchollo se extiende unos 6 km al sur del poblado homónimo, a elevaciones de 4.300-4.900 m s.n.m., en un sector con morfología algo accidentada del flanco septentrional del Volcán Hualca Hualca. La zona de interés geotérmico es accesible mediante un estrecho camino de tierra que desde Pinchollo sube en la ladera del Hualca Hualca hasta la cota de 4.300 m. En el poblado de Pinchollo este camino se conecta con la carretera en modestas condiciones que recorre el Valle del Colca, con acceso desde las ciudades de Chivay y Huambo.

El Volcán Hualca Hualca constituye la porción septentrional y más antigua, profundamente alterada y erosionada, del complejo volcánico activo de Sabancaya. Las manifestaciones termales de Pinchollo son constituidas por varios sectores de alteración hidrotermal con fumarolas, suelos humeantes y un característico chorro de vapor sobrecalentado conocido como Géiser de Pinchollo.

Las manifestaciones termales del Valle del Colca han sido objeto de estudios de reconocimiento e investigaciones geoquímicas ya en los años '80 y '90, los cuales fueron sin embargo enfocados en los manantiales del fondo del valle. La importancia geotérmica del sector de Pinchollo, aunque documentada en el inventario de manifestaciones termales del INGEMMET (Steinmuller y Zavala, 1997), se consolidó en tiempos más recientes, después del 2010, durante actividades de reconocimiento realizadas por empresas privadas, y como resultado de los estudios del Plan Maestro de MINEM-JICA. En 2009-2010 las empresas Hot Rock Peru, S.A., Magma Energía Geotérmica Perú S.A. y Eco Energy SAC¹⁵⁴ solicitaron autorizaciones de exploración en la zona de Pinchollo. Los derechos de exploración fueron luego otorgados a Hot Rock Perú en 2011, la cual los cedió sucesivamente a la empresa EDC Energía Verde Perú, SAC¹⁵⁵, que controla actualmente el sector de principal interés geotérmico mediante la autorización denominada Achumani. Resulta que EDC Energía Verde Perú realizó en 2013-2014 un programa completo de exploración superficial en Achumani, con estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos, y estaría lista para pasar a la fase de perforación exploratoria (Claros, 2015; Vega, 2015).

Los resultados de las exploraciones realizadas por EDC Energía Verde Perú no han sido publicados, así que la información más actualizada públicamente disponible para el área de Pinchollo es la reportada en el Plan Maestro, la cual define la presencia de un importante sistema hidrotermal con recurso de alta temperatura asociado a volcanismo reciente. El potencial estimado mediante cálculo volumétrico-estadístico es de 163 MWe (MINEM-JICA, 2012).

La zona de Pinchollo se encuentra algo alejada del sistema principal de transmisión eléctrica. Según reportado por MINEM-JICA (2012) el punto de conexión a la red más cercano es la subestación de Callalli (138 kV), ubicada 70 km al noreste.

Calacoa-Putina

La zona termal denominada Calacoa - Putina se localiza en la cordillera volcánica del Sur de Peru, en proximidad del poblado de Calacoa - San Cristobal, unos 55 km al noreste de la ciudad de Moquegua (mapa 11). El área es fácilmente accesible desde Moquegua mediante la carretera binacional asfaltada, que conecta con Bolivia y un camino secundario que accede al poblado de Calacoa. El sector de interés geotérmico se extiende sobre el flanco septentrional del Volcán Ticsani, a cotas variables entre 3.800 y más de 5.000 m s.n.m., abarcando laderas volcánicas con morfología desde moderada a abrupta, que bajan hacia el estrecho y profundo valle del Río Putina. De hecho, la conformación morfológica del área puede imponer ciertos retos para el eventual desarrollo de instalaciones geotérmicas.

El interés geotérmico de esta área, además que por la edad muy reciente del Volcán Ticsani, está determinado por la presencia de fumarolas en la parte alta del volcán y de llamativos manantiales, con temperaturas de hasta 94°C, en la base de su ladera septentrional, a lo largo del cañón del Río Putina, y

¹⁵⁴ Hot Rock Perú S.A., subsidiaria de la empresa australiana Hot Rock Ltd.; Magma Energía Geotérmica Perú S.A., subsidiaria de la canadiense Alterra Power Corp.; Eco Energy, compañía registrada en Perú, de capital norteamericano y canadiense.

¹⁵⁵ Subsidiaria de de la empresa filipina Energy Development Corporation (EDC).

de otros manantiales termales en la parte occidental del volcán. Los manantiales termales de la zona de Calacoa son conocidos desde los primeros estudios de reconocimiento geotérmico llevados a cabo en el Sur de Perú a mediados de los años '70, y luego han sido objeto de varias investigaciones geoquímicas dirigidas a caracterizar el sistema hidrotermal. Entre los trabajos más recientes y significativos se reportan los de Scandiffio y Verastegui, 1990; Cruz, 2006; y Masías et al., 2010.

En 2009-2010 las empresas Hot Rock Peru, S.A., Magma Energía Geotérmica Perú S.A. y GeoGlobal Energy Perú¹⁵⁶, solicitaron autorizaciones de exploración sobrepuestas en la zona del Volcán Ticsani. La autorización de exploración fue otorgada a Hot Rock Perú en 2011, la cual cedió sucesivamente sus derechos a la empresa Geotérmica Quellapacheta Perú SAC¹⁵⁷, que controla actualmente el sector de principal interés geotérmico mediante la autorización denominada Quellapacheta (Claros, 2015). Resulta que Geotérmica Quellapacheta Perú llevó a cabo en 2013 un programa completo de exploración superficial sobre todo el complejo volcánico de Ticsani, con estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos (MT), y se encuentra actualmente en fase avanzada de preparación para la ejecución de tres perforaciones exploratorias (GQPS, 2014; Claros, 2015).

Los resultados de las exploraciones realizadas por Geotérmica Quellapacheta Perú no han sido publicados, así que la información más actualizada disponible para el área del Volcán Ticsani es la reportada en el Plan Maestro de MINEM-JICA, y algunos datos publicados por Hot Rock Perú durante las fases preliminares de exploración del área (Urzúa-Monsalve et al., 2012). Ambas fuentes postulan la presencia de un importante sistema hidrotermal con un recurso de alta temperatura asociado a volcanismo reciente. El potencial estimado mediante cálculo volumétrico-estadístico es de 108 MWe (MINEM-JICA, 2012).

La zona de Ticsani se encuentra a pocos km de distancia de la línea de transmisión en 220 kV que conecta Moquegua con Puno, sin embargo, según reportado por MINEM-JICA (2012), el punto de conexión más cercano sería la subestación de Moquegua, ubicada unos 65 km al suroeste. El importante centro minero de Cuajone (Botiflaca), que cuenta con interconexión a la red mediante línea de 138 kV se encuentra unos 35 km al suroeste.

Collo-Titire

La zona denominada Collo-Titire abarca un sector con fuentes termales ubicado en el altiplano del sur de Perú alrededor de los poblados aymara de Titire y Aruntaya, unos 90 km al noreste de la ciudad de Moquegua (mapa 11). El área es fácilmente accesible desde Moquegua mediante la carretera asfaltada que conecta con Puno, la cual cruza la zona de interés geotérmico.

Las fuentes termales se encuentran en un ancho valle a 4.300-4.400 m s.n.m, alineadas a lo largo de un importante sistema de fallamiento regional. La temperatura de los manantiales varía en su mayoría entre los 40 y 65°C, pero alcanza los 83°C (poco inferior al punto de ebullición local) en la extremidad septentrional de la zona termal, en correspondencia de un llamativo grupo de manantiales y géiseres, asociado con un extenso depósito de travertino que conforma un puente natural sobre el cual pasa la carretera Moquegua-Puno. Este sitio es conocido como Collo o Puente Bello y es considerado un Monumento Natural (Zavala, 2011). Los otros manantiales presentan por lo contrario abundantes depósitos de sínter silíceo y se caracterizan localmente por elevada salinidad.

El sector presenta una morfología muy suave conformada por productos volcánicos cenozoicos, y depósitos clásticos cuaternarios. No existe volcanismo reciente, y el arco volcánico cuaternario se encuentra unos 30 km al suroeste, por lo cual se considera que se trate de un sistema geotermal de tipo tectónico, asociado con circulación profunda a lo largo de fallas.

¹⁵⁶ Hot Rock Perú S.A., subsidiaria de la empresa australiana Hot Rock Ltd.; Magma Energía Geotérmica Perú S.A., subsidiaria de la canadiense Alterra Power Corp.; GeoGlobal Energy Perú, subsidiaria de la empresa norteamericana GeoGlobal Energy LLC. Geoglobal Energy LLC fue sucesivamente absorbida por la empresa neozelandesa Mighty River Power, la cual detiene actualmente los derechos relacionados con las aplicaciones geotérmicas de Geoglobal Energy Peru, y está operando en el país mediante una nueva subsidiaria denominada Andina Geotérmica SAC.

¹⁵⁷ Subsidiaria de la empresa filipina Energy Development Corporation (EDC).

El área termal de Collo-Titire fue inicialmente identificada y caracterizada en el inventario de manifestaciones termales del INGEMMET (Steinmuller y Zavala, 1997), y luego confirmada como área de interés geotérmico en el Plan Maestro de MINEM-JICA (2012), mediante la ejecución de estudios adicionales de reconocimiento geológico y geoquímico. Los resultados de dichos estudios definen condiciones favorables para la existencia de un recurso geotérmico con temperatura un poco superior a los 200 °C, y con un potencial estimado en aproximadamente 40 MWe mediante el método volumétrico-estadístico (MINEM-JICA, 2012).

El prospecto geotérmico de Collo ha sido objeto de diferentes solicitudes de autorización de exploración, parcialmente sobrepuestas, por parte de empresas privadas (GeoGlobal Energy Perú, Enel Green Power Perú), pero ninguna ha sido adjudicada hasta la fecha.

La zona de Collo se encuentra en proximidad de la línea de transmisión en 220 kV que conecta Moquegua con Puno, sin embargo, según reportado por MINEM-JICA (2012), el punto de conexión más cercano sería la subestación de Moquegua, ubicada 117 km al suroeste. Los importantes centros mineros de Cuajone (Botiflaca) y Toquepala, que cuentan con interconexión a la red mediante línea de 138 kV se encuentran a distancias un poco menores, aproximadamente a 70-80 km al suroeste.

Crucero

La zona termal de Crucero se encuentra en el altiplano del sur de Perú en el sector inmediatamente al este del lago artificial de Pasto Grande, en la zona fronteriza entre los Departamentos de Moquegua y Puno, unos 100 km al noreste de la ciudad de Moquegua (mapa 11). El área es fácilmente accesible desde Moquegua mediante la carretera binacional asfaltada que conecta con Bolivia y luego por un camino secundario que accede al sector de Pasto Grande y Crucero, donde se encuentran varios asentamientos de comunidades aymara. La elevación del área varía entre los 4.500 y 4.600 m s.n.m.

En la zona existen varios manantiales termales al interior de una cuenca tectónica controlada por un importante sistema de fallamiento regional. Los manantiales descargan aguas cloruradas con temperatura de hasta 73 °C y están asociados con extensos depósitos de sinter silíceo.

El sector presenta una morfología muy suave, conformada por formaciones volcánicas cenozoicas y depósitos clásticos cuaternarios. El área se encuentra algo retirada del arco volcánico cuaternario, que corre unos 40 km al suroeste, y el volcanismo más reciente está representado por un por un ancho domo riolítico (Quesllampo) del Pleistoceno Inferior. Se considera por lo tanto que el sistema hidrotermal presente en el área sea de tipo tectónico, principalmente controlado por circulación profunda a lo largo de fallas.

El área termal de Crucero fue inicialmente identificada y caracterizada en el inventario de manifestaciones termales del INGEMMET (Huamaní, 2001), y luego confirmada como área de interés geotérmico en el Plan Maestro de MINEM-JICA (2012), mediante la ejecución de estudios adicionales de reconocimiento geológico y geoquímico. Los resultados de dichos estudios definen condiciones favorable para la existencia de un recurso geotérmico con temperatura un poco superior a los 200 °C, y con un potencial estimado en aproximadamente 80 MWe mediante el método volumétrico-estadístico (MINEM-JICA, 2012).

La empresa Magma Energía Geotérmica Perú S.A.¹⁵⁸ obtuvo una autorización de exploración geotérmica en la zona de Crucero (denominada Crucero), y otras en sectores adyacentes al noroeste (denominada Panejo) y sureste (denominada Loriscota), abarcando un amplio tramo del sistema de fallas que controla las manifestaciones termales; sin embargo, la empresa abandonó dichas autorizaciones en 2014, al terminar su plazo administrativo para las ejecución de investigaciones de superficie. Los resultados de las exploraciones efectuadas por Magma Energía Geotérmica Perú, aparentemente limitadas a reconocimientos geológicos y geoquímicos, no han sido publicados.

¹⁵⁸ Subsidiaria de Alterra Power Corp. empresa canadiense de energías renovables.

Las actividades de Magma Energía Geotérmica Perú en la zona de Crucero han encontrado inicialmente fuerte oposición por parte de las comunidades locales; luego el problema se resolvió después de una intensa labor de comunicación y articulación entre todos los actores, incluyendo comunidades, empresa, e instituciones nacionales, regionales y locales (Muñoz et al., 2014).

La zona de Crucero se encuentra algo alejada del sistema principal de transmisión eléctrica. Según reportado por MINEM-JICA (2012) el punto de conexión más cercano es la subestación de Moquegua, ubicada 117 km al suroeste. Los importantes centros mineros de Cuajone (Botiflaca) y Toquepala, que cuentan con interconexión a la red mediante línea de 138 kV se encuentran a distancias un poco menores, aproximadamente 75 km al suroeste.

Pinaya

El área geotermal de Pinaya está ubicada en el interior del altiplano del sur de Perú, en la región geotérmica Cuzco-Puno, en proximidad del poblado de Pinaya, 80 km al oeste de la ciudad de Juliaca (mapa 11). El área es accesible desde la carretera asfaltada Puno-Arequipa mediante un camino de tierra en modestas condiciones. La elevación del área varía entre los 4.300 y 4.700 m s.n.m. El sector de interés geotérmico abarca una amplia explanada y las laderas de la Cordillera de Sillapaca, en una zona con morfología suave, de bofedales y pastizales.

El prospecto geotérmico de Pinaya se caracteriza por varios manantiales termales, asociados con depósitos de sinter y alteración hidrotermal, con descarga de aguas cloruradas y sulfatadas, cuya temperatura varía entre 60 y 83°C. La geología del área está principalmente conformada por volcanitas del Neogeno y se caracteriza por la presencia de un importante lineamiento tectónico regional denominado Falla Cuzco-Lagunillas (Cruz y Matsuda, 2014). No existe volcanismo reciente, por lo cual se considera que se trate de un sistema geotermal de tipo tectónico, controlado por circulación profunda a lo largo de fallas.

El área termal de Pinaya fue inicialmente identificada y caracterizada en el inventario de manifestaciones termales del INGEMMET (Huamaní, 2001) y luego confirmada como área de interés geotérmico en el Plan Maestro de MINEM-JICA (2012), mediante la ejecución de estudios adicionales de reconocimiento geológico y geoquímico. Los resultados de dichos estudios definen condiciones favorable para la existencia de un recurso geotérmico con temperatura alrededor de los 190°C, y con un potencial estimado en 37 MWe mediante el método volumétrico-estadístico (MINEM-JICA, 2012).

La empresa Eco Energy SAC¹⁵⁹ obtuvo entre 2011 y 2012 una serie de seis autorizaciones de exploración geotérmica adyacentes en la zona de Pinaya, las cuales son actualmente vigentes, con plazo de vencimiento en 2017 (Claros, 2015). Los resultados de las exploraciones efectuadas por Eco Energy no han sido publicados, pero no resulta que la empresa haya realizado labores más avanzadas del reconocimiento geológico y geoquímico preliminar.

La zona de Pinaya se encuentra en un sector algo alejado del sistema principal de transmisión eléctrica. Según reportado por MINEM-JICA (2012) el punto de conexión más cercano es la subestación de Callalli, ubicada unos 70 km al oeste.

Tutupaca, Calientes, Ancoccollo, Borateras, Chungara-Kallapuma

La extremidad meridional de la cordillera volcánica del sur de Perú, en el tramo de aproximadamente 80 km de largo entre el Volcán Tutupaca, al noroeste, y el Volcán Casiri, al sureste, comprende un denso aglomerado de edificios volcánicos de edad pleistocena-holocena (algunos, como el Tutupaca, con actividad histórica), asociados con fallas muy recientes y numerosas manifestaciones termales de alta temperatura.

Este sector, debido a su contexto geo-vulcanológico y a las características y densidad de manifestaciones termales representa la zona con las potencialidades de desarrollo de recursos geotérmicos

¹⁵⁹ Compañía registrada en Perú, de capital norteamericano y canadiense.

de alta temperatura más promisorio del Perú, y posiblemente una de las más atractivas de toda América del Sur. De hecho ha sido objeto de particular interés ya a partir de los primeros estudios de reconocimiento efectuados en el país a inicios de los años '80. Las diferentes zonas termales han sido estudiadas y reportadas en literatura bajo nombres a veces distintos, pero con el tiempo se han ido formando agrupaciones identificadas como prospectos geotérmicos independientes. Este trabajo ha sido consolidado en el Plan Maestro de MINEM-JICA (2012) con la definición de cinco áreas geotérmicas principales, denominadas Tutupaca, Calientes, Ancoccollo, Borateras y Chungara-Kallapuma (mapa 11). Todas estas áreas se encuentran distribuidas a distancias de pocas decenas de km una de otra, abarcando sectores con elevación generalmente comprendida entre los 4.000 y 4.500 m s.n.m., en contextos territoriales y geotermiales muy similares, por lo cual se tratan como un único grupo en este documento.

El acceso a todas las áreas es relativamente fácil desde las ciudades de Moquegua y Tacna, pasando por los centros principales de Candarave o Tarata, mediante una red vial bien desarrollada, con caminos de diferente rango, generalmente en buenas a modestas condiciones. En la mayoría de los casos, las principales zonas de manifestaciones termales son atravesadas o fácilmente alcanzables mediante caminos de acceso vehicular.

La morfología de la zona es variable entre muy suave en el altiplano al noreste de la cordillera volcánica y localmente abrupta en los flancos al suroeste de la cordillera, que constituyen el borde del altiplano. Sin embargo, la mayoría de los sectores de mayor interés presentan condiciones topográficas muy favorables para el eventual desarrollo de instalaciones geotérmicas.

Como ocurre típicamente en la región altiplánica y en la alta cordillera del sur de Perú, las áreas de interés geotérmico en consideración son zonas muy poco pobladas, con pequeñas comunidades indígenas dispersas en el territorio. Toda la zona de interés geotérmico, con exclusión del sector de Tutupaca, está incluida en el Área de Conservación Regional Vilacota-Maure, instituida por el Gobierno de Tacna en 2009 con el objetivo de proteger los ecosistemas, la flora y la fauna silvestre y los recursos hídricos de la región alto andina¹⁶⁰.

Los diferentes prospectos geotérmicos se caracterizan por la presencia de abundantes y localmente extensas descargas termales en superficie (fumarolas, géiseres, suelos calientes y manantiales), frecuentemente con temperaturas de ebullición. Las características geoquímicas de las aguas termales de derivación geotérmica profunda son muy homogéneas a lo largo de todo este sector e indican consistentemente temperaturas de equilibrio en el reservorio superiores a los 200°C (Scandiffio y Verastegui, 1990, MINEM-JICA, 2012).

Los estudios geotérmicos en esta región han iniciado a principios de los años '80 y se han mantenido por mucho tiempo al nivel de reconocimientos geológicos y geoquímicos, hasta que a partir del 2007 el programa de investigaciones del INGEMMET recibió apoyo del Gobierno del Japón para mejorar la exploración en las áreas más prometedoras. En este contexto, entre 2007 y 2008 el INGEMMET, con la asistencia de JBIC, y con participación de la empresa japonesa West-Jec, llevó a cabo un programa de investigaciones geológicas, geoquímicas y geofísicas (MT), con evaluación del recurso a nivel de pre-factibilidad, en las áreas de Calientes y Borateras (Vargas et al., 2012a; Vargas et al., 2012b). Sucesivamente, en el ámbito de los estudios del Plan Maestro fueron llevadas al mismo nivel de exploración también las áreas de Tutupaca y Ancoccollo (MINEM-JICA, 2012). En los estudios del Plan Maestro fue determinado el potencial de cada área geotérmica mediante aplicación del método volumétrico-estadístico, reportando valores de 114 MWe para Tutupaca, 100 MWe para Calientes, 98 MWe para Ancoccollo, 40 MWe para Borateras y 84 MWe para Chungara-Kallapuma, por un total de 436 MWe entre todos los prospectos.

A partir del 2010 varias empresas¹⁶¹ han estado solicitando autorizaciones de exploración, muchas de ellas sobrepuestas, que prácticamente cubren todo el sector entre Tutupaca y Casiri. Sin embargo, debido a las limitaciones de carácter ambiental y administrativo impuestas por el Área de

¹⁶⁰ <http://acrvilacotamaure.com/anp-areas-naturales-protectidas-peru/proyecto>.

¹⁶¹ Andes Power Perú, EMX Geothermal Perú, Enel Green Power Peru, GeoGlobal Energy Perú, Hot Rock Peru, Magma Energía Geotérmica Perú, Muruhuay.

Conservación Regional Vilacota-Maure, hasta el momento han sido otorgadas solamente dos autorizaciones en el sector de Tutupaca, que queda afuera del área protegida. De esta manera el prospecto geotérmico de Tutupaca ha sido controlado en su sector meridional por la empresa Andes Power Perú SAC¹⁶², mediante la autorización de exploración “Tutupaca” y en el sector septentrional por Magma Energía Geotérmica Perú S.A.¹⁶³, mediante la autorización “Tutupaca Norte”. Ambas empresas abandonaron las áreas en 2014-2015, al finalizar la vigencia del período de estudios de superficie. Todo el sector Tutupaca - Casiri está por lo tanto sin autorizaciones de exploración vigentes en este momento, aunque las gestiones entre algunas empresas y el MINEM siguen y resulta que ciertas aplicaciones en sectores de menor sensibilidad ambiental al interior del Área de Conservación Regional Vilacota-Maure estén encaminadas a recibir aprobación de las autoridades ambientales (Muñoz et al., 2014).

4. Potencial geotermo-eléctrico

Para todas las 61 áreas geotérmicas identificadas en Perú, MINEM-JICA (2012) ha efectuado una estimación de potencial aplicando el método volumétrico de calor almacenado, sumando un total de 2.860 MWe. Obviamente dicha estimación se basa en niveles de información geotérmica variables de prospecto en prospecto, y en general no muy avanzados, así que el resultado obtenido debe considerarse como una estimación gruesa del potencial geotermo-eléctrico del Perú.

El potencial correspondiente a los recursos más promisorios indicados en la cuadro 7, que son los que cuentan también con un mejor nivel de información, y por ende con las estimaciones más representativas, es 898 MWe, con valores unitarios que varían entre 35 MWe y 110 MWe. Según MINEM-JICA (2012) la capacidad de generación que se podría lograr en las áreas geotérmicas más promisorias suma a 640 MWe.

Evaluaciones anteriores habían estimado un potencial para Perú variable entre los 600 y 1.410 MW, que podría aumentar hasta los 2.990 MW en condiciones de desarrollo tecnológico más avanzado, no mejor especificado (Gawell et al., 1999).

5. Situación actual y perspectivas de desarrollo

El período 2010-2013 se caracterizó por el surgimiento de un fuerte interés hacia la geotermia en el Perú. El Ministerio de Energía y Minas, con la colaboración de JICA, se dedicó a la preparación del Plan Maestro para el Desarrollo de la Energía Geotérmica y, de esta manera Perú se volvió en el único país de América del Sur dotado de un instrumento de referencia completo y moderno para la gestión del recurso geotérmico. Por otro lado, varias empresas privadas nacionales y extranjeras (australianas, canadienses, italianas, norteamericanas), contando con un marco regulatorio más claro después de la reforma en 2010 del Reglamento de la Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos, han ido solicitando y obteniendo autorizaciones de exploración en varias regiones del país. En el período 2010-2013 se dieron así importantes avances, tanto en la preparación y articulación del sector geotérmico, como en el reconocimiento del recurso a nivel nacional (Muñoz et al., 2014), pero sucesivamente la situación se estancó. Varias empresas se retiraron, suspendieron actividades o, en todo caso, no avanzaron sustancialmente con los programas de exploración.

En 2013, dos de las empresas geotérmicas que se habían asegurado autorizaciones de exploración en los mejores prospectos disponibles afuera del área protegida Vilacota-Maure (Hot Rock Perú y Magma Energía Geotérmica Perú¹⁶⁴), cedieron totalmente o parcialmente la gestión de sus proyectos a la compañía filipina Energy Development Corporation (EDC), la cual se ha vuelto en la principal entidad que en los últimos años ha estado realizando actividades de exploración geotérmica en el Perú.

EDC está operando en el país mediante las empresas subsidiarias Geotérmica Quellapacheta Perú SAC y EDC Energía Verde S.A., y ha concentrado su interés en los proyectos denominados

¹⁶² Empresa registrada en Perú, de capital norteamericano.

¹⁶³ Subsidiaria en Perú de la empresa canadiense de energías renovable Alterra Power Corp.

¹⁶⁴ Hot Rock Perú S.A., subsidiaria de la empresa australiana Hot Rock Ltd.; Magma Energía Geotérmica Perú S.A., subsidiaria de la canadiense Alterra power Corp.

Quellapacheta y Achumani, respectivamente ubicados en las zonas definidas en el Plan Maestro como Calacoa-Putina (en correspondencia del Volcán Ticsani) y Chivay-Pinchollo (en correspondencia del Volcán Hualca Hualca, Valle del Colca), ambas en el sur de Perú. Las exploraciones realizadas por EDC en dichas áreas incluyen estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos, lo cual las ha llevado a concluir la Fase I del proceso administrativo peruano y pasar a la Fase II de exploración que contempla la perforación de por lo menos tres pozos profundos (Vega, 2015). EDC está actualmente preparando una campaña de perforaciones exploratorias en el proyecto Quellapacheta (Cruz y Vargas, 2015; GQPS, 2014), pero sus actividades parecen haberse estancado en el transcurso de 2015 e inicios de 2016.

En cuanto a las actividades de las otras empresas que todavía detienen autorizaciones de exploración vigentes (EcoEnergy SAC, EMX Geothermal Perú S.A.C., Enel Green Power Perú S.A., Magma Energía Geotérmica Perú, S.A.), no hay muchos datos publicados, pero la información disponible indica que sus actividades se han limitado a estudios de reconocimiento geológico, geoquímico y ambiental.

Las perspectivas de desarrollo para el sector geotermo-eléctrico de Perú no están por lo tanto muy definidas en este momento, dado que no se cuenta con ningún proyecto en fase avanzada de exploración, con pozos perforados y recurso confirmado. Por otro lado, los mejores prospectos están siendo obstaculizados por restricciones ambientales, particularmente en del Área de Conservación Regional Vilacota-Maure, donde se encuentran los recursos geotérmicos más atractivos de todo Perú.

G. República Bolivariana de Venezuela

1. Reseña histórica de la investigación geotérmica

La investigación de recursos geotérmicos para fines energéticos en Venezuela inició a mediados de los años '70 y se mantuvo particularmente activa hasta la primera mitad de los años '90. Los estudios fueron inicialmente liderados por la Compañía Anónima de Administración y Fomento Eléctrico de Caracas (CADAFE) y sucesivamente por el Ministerio de Energía y Minas (MEM) que, con la colaboración de universidades nacionales, realizaron un amplio inventario de las manifestaciones geotérmicas del país (Urbani, 1991). La información obtenida llevó a considerar la zona de El Pilar - Casanay, en el Estado de Sucre, como el único prospecto geotérmico conocido con posibilidades para la explotación geotermo-eléctrica (Urbani et al., 1999; Urbani, 2009).

De hecho, las investigaciones fueron enfocadas en El Pilar - Casanay ya a partir de los años '70, y han alcanzado un significativo nivel de evaluación del recurso mediante estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos, realizados también con asesoría de la empresa eléctrica estatal italiana ENEL (1975-1981), del BRGM de Francia (1981) y de la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA, 1984-1994) (Urbani et al., 1999). Con el apoyo de la OIEA, en particular, se realizaron estudios geoquímicos avanzados que llevaron a la definición de un modelo geotérmico conceptual del recurso (D'Amore et al. 1990 y 1994; Urbani, 1999).

A finales de los años '80 CADAFE retomó interés en el proyecto El Pilar - Casanay, con la intención de proceder con el desarrollo comercial del área. Contrató a la empresa de ingeniería ASINCRO C.A. de Caracas para la realización de una síntesis de la información disponible y de un programa de perforación exploratoria; sin embargo, la iniciativa no prosperó y fue progresivamente abandonada en la primera mitad de los años '90 (Urbani, 1999). Sucesivamente no hubo mayor interés para el sector geotérmico en Venezuela y el proyecto sigue actualmente inactivo (Urbani F. comunicación personal, 2015).

2. Marco legal

En Venezuela todas las actividades del sector eléctrico son controladas por el Estado. La Empresa Eléctrica Nacional (CORPOELEC), creada en 2007 y adscrita al Ministerio del Poder Popular de Energía Eléctrica

(MPPEE), es una institución que nació con la visión de reorganizar y unificar el sector eléctrico venezolano y que actúa como empresa operadora estatal encargada de la realización de las actividades de generación, transmisión, distribución y comercialización de potencia y energía eléctrica¹⁶⁵.

El sector de las energías renovables en Venezuela, con excepción de la hidroeléctrica en gran escala, que es parte sustancial de sistema de generación nacional, se encuentra en una fase incipiente, tanto desde el punto de vista de las instalaciones, principalmente enfocadas en los sistemas aislados, como de los instrumentos legales y administrativos para el fomento y regulación del sector. En particular no existe política o legislación específica para el fomento y desarrollo de la energía geotérmica en el país. Según reportado por IRENA (2015b) Venezuela estaría en fase de preparación de una política para la generación con fuentes renovables.

3. Principales proyectos geotérmicos

Como mencionado anteriormente, el principal proyecto identificado en Venezuela con claras perspectivas para la generación de electricidad es el denominado El Pilar - Casanay, ubicado en la región costera septentrional del Estado de Sucre. Su ubicación y características principales se reportan en la mapa 12 y en el cuadro 8.

La zona de interés geotérmico principal en el sector de El Pilar - Casanay se caracteriza por la presencia de numerosas manifestaciones termales (manantiales calientes, fumarolas, zonas de alteración y depósitos de azufre), muchas con temperaturas entre los 80 y 100°C, distribuidas a lo largo del sistema de fallamiento transcurrente dextral de El Pilar, el cual es parte del borde septentrional de la placa Suramericana con la placa del Caribe. El sector con mayor concentración de manifestaciones termales, y de mayor temperatura, abarca un tramo aproximadamente 10 km entre los caseríos de Las Minas, Aguas Calientes y Mundo Nuevo. No existe actividad volcánica en el área, sin embargo la información geológica y geofísica sugiere una posible fuente de calor asociada con intrusiones magmáticas recientes controladas por zonas de debilidad tectónica a lo largo de la Falla de El Pilar. La interpretación de datos geoquímicos de aguas y gases termales indica la posible presencia de un recurso geotérmico de alta entalpía con temperaturas superiores a los 200°C, y que puede alcanzar los 250-300°C en las porciones profundas del sistema geotermal (D'Amore et al., 1994; Urbani et al., 1999).

El área de El Pilar - Casanay se desarrolla en un territorio con morfología suave, a elevaciones variables entre los 80 y 400 m s.n.m., en una zona rural económicamente deprimida, pero fácilmente accesible desde las ciudades de Casanay y Carúpano. No existen áreas protegidas o limitaciones de carácter ambiental para el eventual desarrollo de un proyecto geotérmico.

Cabe por otro lado considerar que en Venezuela han sido inventariadas aproximadamente 70 zonas termales. Con base en la información presentada por Urbani (1991), algunas de estas zonas, particularmente las asociadas con el sistema de fallas Trinchera-Mariara, en los valles intermedios de la Cordillera de la Costa, y las de Chichiriviche y Caruao en la Faja Costera, se caracterizan por datos geotermométricos de cierto interés, en el rango de 150-200°C, por lo cual no se puede excluir que contengan recursos aptos para la generación de electricidad con las modernas tecnologías binarias. Estas áreas cuentan solamente con estudios de reconocimiento preliminar.

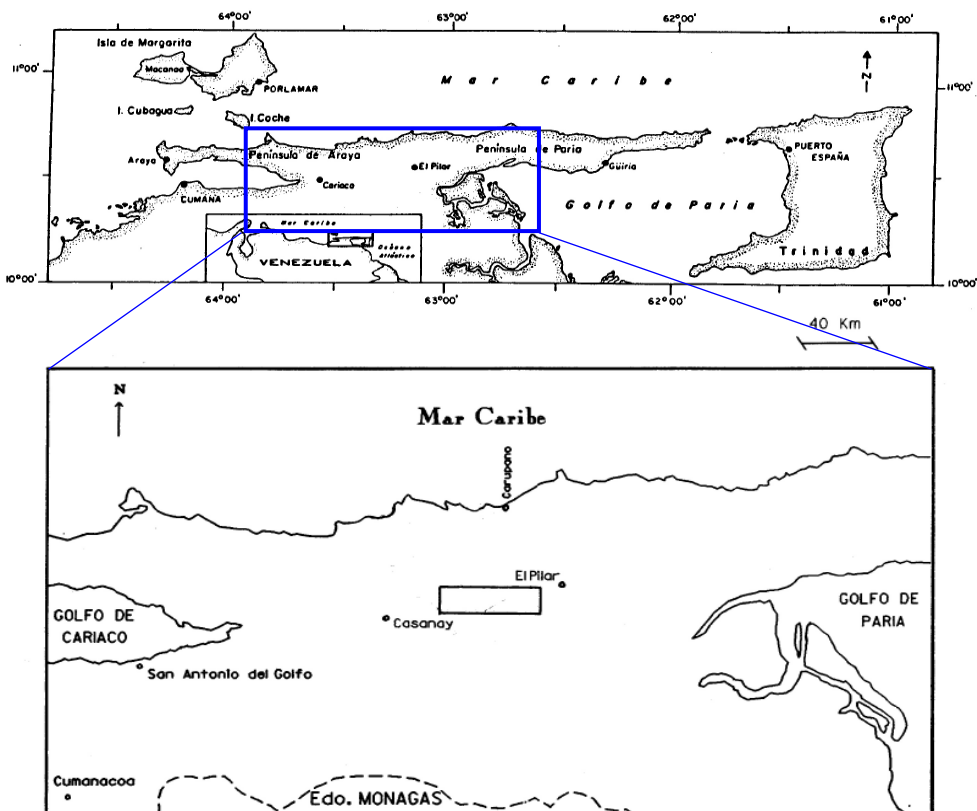
Cuadro 8
Áreas geotérmicas con perspectivas de desarrollo eléctrico de Venezuela

Provincia Geológica	Región administrativa	Área geotérmica	Nivel de estudio	Temperatura Estimada / medida (°C)	Potencial reportado (MWe)
Cuenca Cariaco-Paría	Estado Sucre	El Pilar - Casanay	Reconocimiento	220-300	134-163

Fuente: Elaboración propia.

¹⁶⁵ <http://www.corpoelec.gob.ve/qui%C3%A9nes-somos>.

Mapa 12
Ubicación de la zona de mayor interés geotérmico de la República Bolivariana de Venezuela;
El Pilar - Casanay, Estado Sucre



Fuente: Urbani et al., 1999 (modificado).

Nota: Los límites y los nombres que figuran en este mapa no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

4. Potencial geotermo-eléctrico

Debido al limitado nivel de investigación disponible, no se cuenta con mucha información acerca del potencial geotermo-eléctrico de Venezuela. Se menciona sin embargo que Cataldi et al. (1987) reportaron un potencial estimado en el rango 134-163 MWe para la zona de El Pilar - Casanay, mientras que Gawell et al. (1999) estimaron un potencial a nivel nacional de Venezuela variable entre los 370 y 480 MWe, que podría aumentar hasta los 910 MWe en condiciones de desarrollo tecnológico más avanzado, no mejor especificado.

5. Situación actual y perspectivas de desarrollo

El sector geotérmico en Venezuela ha estado completamente inactivo durante los últimos veinte años, y no cuenta con una política, regulación y planificación para el desarrollo de proyectos de generación geotermo-eléctrica. No se conoce de iniciativas concretas o planes para su reactivación en el corto plazo. La planificación del sistema eléctrico nacional¹⁶⁶, si bien prevé impulsar un cambio en la matriz de fuentes de generación de electricidad favoreciendo el uso de energías limpias, no considera ninguna acción para el desarrollo de la energía geotérmica.

¹⁶⁶ PDSN 2013-2019 - Plan de Desarrollo del Sistema eléctrico Nacional. Ministerio del Poder Popular para la Energía Eléctrica. Documento disponible en: http://www.mppce.gob.ve/download/publicaciones_varias/PDSN%20web.pdf.

II. Base de datos de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur

A. Selección de proyectos

El potencial geotérmico de América del Sur se concentra en los países de la región andina, donde han sido inventariadas por lo menos 1.850 manifestaciones termales e identificadas más de 200 áreas de interés geotérmico (cuadro 1).

Durante los últimos 40 años todos los países de la región, a menudo con el apoyo técnico y financiero de organismos internacionales, han dedicado esfuerzos a la investigación del recurso geotérmico, generando una gran cantidad de datos de exploración. La situación de cada país ha sido analizada en el capítulo anterior, con particular atención en la identificación de los proyectos más significativos.

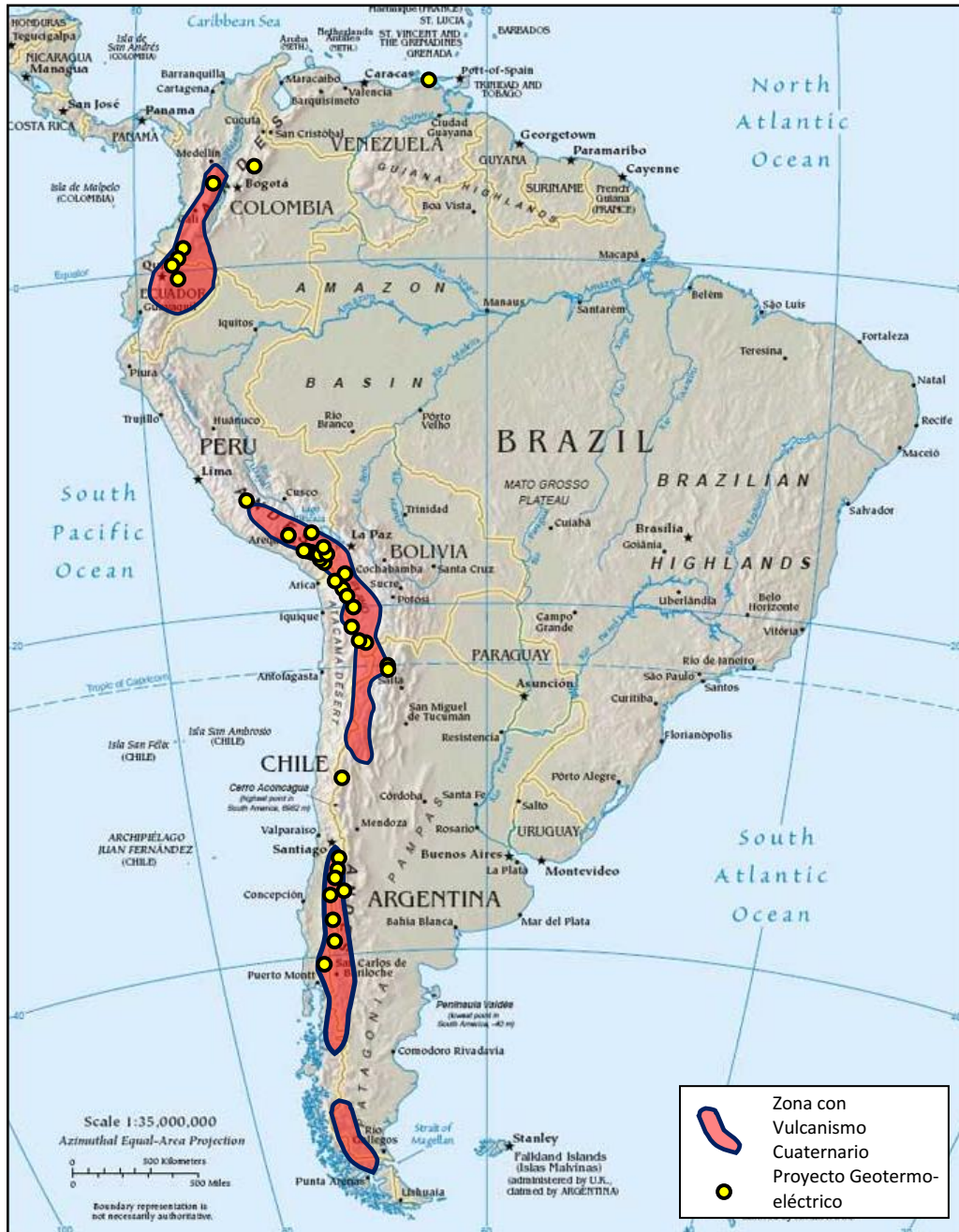
Con base en los resultados del análisis efectuado en el capítulo anterior, se preparó una base de datos de proyectos con perspectivas concretas y documentadas de contener un recurso apto para el desarrollo geotermo-eléctrico comercial. Para tal fin se tomaron en consideración solamente los proyectos sustentados por resultados de exploración promisorios y/o por evidencias en superficie (manifestaciones termales y otros rasgos geológicos y estructurales) claramente consistentes con la presencia de un sistema geotérmico bien desarrollado.

No se efectuaron distinciones entre prospectos de baja y alta temperatura, pero se consideraron como requisitos mínimos para la selección una temperatura estimada o medida del recurso de 120-130°C y un potencial estimado de por lo menos unos 10 MWe.

De esta manera, se identificaron en total 37 proyectos, los cuales representan las principales opciones actualmente disponibles en el mercado geotérmico suramericano para la realización de desarrollos geotermo-eléctricos en el corto-mediano plazo.

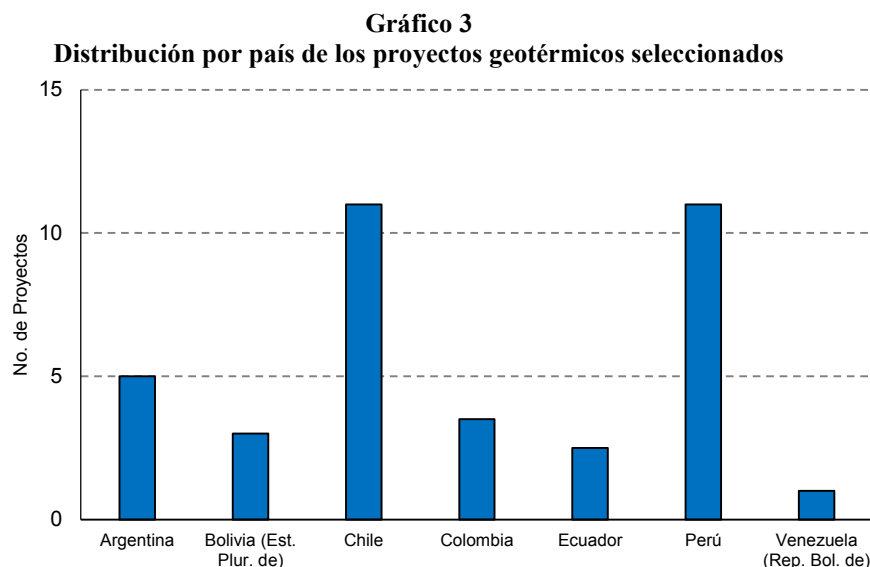
La ubicación de dichos proyectos se presenta en el mapa 13, mientras que su distribución entre los varios países se ilustra en el gráfico 3.

Mapa 13
Ubicación de los proyectos geotérmicos seleccionados



Fuente: Mapa base tomado de: <http://www.lugaresdondeviajar.com/2013/01/sudamerica-es-el-subcontinente-austral>.

Nota: Los límites y los nombres que figuran en este mapa no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.



La selección de los proyectos ha sido basada en la información disponible en fuentes bibliográficas de público acceso, en entrevistas con algunos expertos y operadores del sector, y en el conocimiento personal de los autores del presente documento. No se excluye que puedan existir datos adicionales que no han sido considerados por ser de acceso restringido (particularmente en el caso de proyectos bajo el control de entidades privadas), lo cual puede haber llevado a la exclusión o evaluación incorrecta de algún proyecto. De igual manera, se observa que dentro de la gran cantidad de áreas geotérmicas identificadas en América del Sur (más de 200) existen seguramente otros prospectos interesantes, que sin embargo no cuentan todavía con un nivel de investigación y documentación suficiente como para confirmar su perspectiva de desarrollo geotermo-eléctrico comercial.

B. Estructura de la base de datos

La base de datos ha sido diseñada con el fin de sintetizar las características de los recursos geotérmicos y el estado de avance de los proyectos, identificar sus fortalezas y debilidades en el contexto territorial, ambiental, social, institucional y de mercado, así como para facilitar la clasificación y la comparación de los proyectos en función de elementos específicos que se quieran analizar.

La información contenida en la base de datos está organizada mediante las secciones principales y sub-secciones que se presentan en los cuadros 9 a 12, y se describen a continuación.

1. Identificación del proyecto

Esta sección de la base de datos provee información para la identificación y ubicación general de cada proyecto. Incluye las sub-secciones indicadas en la tabla siguiente:

País	Territorio nacional en el cual se ubica el proyecto geotérmico. En caso de que el área geotérmica se extienda sobre el confín entre dos países, se atribuye el proyecto a ambos países.
Estado, región o provincia	Subdivisión territorial administrativa de primer orden en la cual se ubica el proyecto. Dependiendo del país, puede denominarse Estado, Región o Provincia.
Nombre	Define el nombre del proyecto especificando los siguientes términos: Sistema geotérmico: con referencia a la denominación más común utilizada en literatura, o al complejo volcánico al cual se asocia el sistema geotérmico. Sector: identifica un sector específico del sistema geotérmico cuando éste está conformado por diferentes zonas que constituye proyectos de exploración independientes.

2. Situación legal y administrativa

Define la situación actual del proyecto en cuanto a propiedad y derechos administrativos que amparan su exploración y/o desarrollo. Incluye las sub-secciones indicadas a continuación:

Propiedad	<p>Define la entidad que detiene los derechos de exploración o explotación geotérmica, o que de alguna otra forma mantiene el control del proyecto, especificando lo siguiente:</p> <p>Tipo: características de la entidad que controla el proyecto: privada, pública o mixta pública-privada (PPP).</p> <p>Operador: nombre de la entidad, o entidades, que detienen los derechos de exploración y/o explotación geotérmica, o que sin tener derechos específicos (como ocurre comúnmente en el caso de instituciones del Estado) está actualmente realizando actividades en el proyecto.</p>
Derechos sobre recurso geotérmico	<p>Provee información sobre el instrumento administrativo al cual está sujeto el proyecto, especificando los siguientes elementos:</p> <p>Tipo: tipo de instrumento administrativo (concesión, autorización, otro) que ampara los derechos de exploración o explotación geotérmica del proyecto.</p> <p>Válido hasta: fecha de vencimiento del instrumento administrativo que ampara los derechos de exploración o explotación geotérmica del proyecto.</p> <p>Nombre: nombre registrado del instrumento administrativo que ampara los derechos de exploración o explotación geotérmica del proyecto.</p>

3. Etapa de desarrollo

Identifica el estado de actividad y el nivel de desarrollo de cada proyecto, con particular referencia a la fase de estudio en la cual se encuentra y a la cantidad y características de las perforaciones realizadas. Incluye las sub-secciones indicadas a continuación:

Estado-proyecto	<p>Define la situación en la cual se encuentra el proyecto, utilizando las definiciones siguientes:</p> <p>Activo: con labores de exploración o desarrollo actualmente en curso o realizadas en el transcurso de los últimos dos años, estando actualmente el proyecto en fase de evaluación, planificación y/o gestión de permisos para actividades sucesivas.</p> <p>Suspendido: cuando el proyecto se encuentra bajo el control de una entidad bien definida, pero no hay evidencia de actividades significativas (trabajos de campo, planificación gestiones de permisos) durante los últimos dos años.</p> <p>Inactivo: el proyecto no está controlado por una entidad bien definida e interesada en su desarrollo, y/o las últimas actividades ocurrieron hace más de cinco años.</p>
Etapa-proyecto	<p>Define el nivel de desarrollo en el cual se encuentra el proyecto, utilizando la siguiente clasificación:</p> <p>Reconocimiento: identificación preliminar del recurso mediante estudios geológicos, análisis de manifestaciones termales y geoquímica de fluidos.</p> <p>Exploración superficie: disponibilidad de levantamientos 3G (geología, geoquímica, geofísica) y eventuales perforaciones de gradiente térmico someras.</p> <p>Perforación de prueba: estudios completos de exploración de superficie más</p> <p>Perforación de uno o pocos pozos de diámetro reducido a profundidad > 500 m.</p> <p>Perforación Exploratoria: hasta tres pozos profundos de diámetro estándar.</p> <p>Factibilidad: más de tres pozos exploratorios de diámetro estándar. Estudio de factibilidad en curso, o si ya existe necesita actualización y revisión.</p> <p>Desarrollo: estudio de factibilidad completo, proyecto listo para proceder con instalación de una planta geotermo-eléctrica, o en fase de construcción.</p>

Perforaciones	<p>Resume la cantidad, el tipo y la profundidad de las perforaciones realizadas en el proyecto, clasificando los pozos de la siguiente manera:</p> <p>Pozo gradiente: cualquier tipo de perforación con profundidad <500 m realizada para obtener información sobre gradiente térmico y anomalías de temperatura en el subsuelo somero.</p> <p>Diamantino: pozo perforado con tecnología diamantina, terminado con diámetro HQ/3,78" o menor, a profundidad > 500 m.</p> <p>Diámetro reducido: pozo perforado con tecnología convencional (rotación con destrucción de núcleo), con diámetro final <8"1/2 a profundidad > 500 m.</p> <p>Diámetro estándar: pozo perforado con tecnología convencional (rotación con destrucción de núcleo), con profundidad > 500 m y diámetro final \geq 8"1/2.</p> <p>Adicionalmente se reporta el número total de pozos perforados en cada proyecto y el correspondiente rango de profundidad en metros.</p>
---------------	---

4. Características y ubicación del recurso

Esta sección contiene una descripción de las condiciones generales del proyecto, resumiendo las características estimadas o medidas del recurso en el del subsuelo, y los aspectos físicos y logísticos del área. Los parámetros utilizados en esta sección son los siguientes:

Tipo de sistema	<p>Clasifica el sistema geotérmico con base en consideraciones generales de carácter geológico e hidrogeológico. Se hace referencia al criterio general propuesto por Goff y Janick (2000) que subdivide los sistemas geotérmicos en:</p> <p>Volcánico: asociado con fuente de calor relativamente somera derivada de actividad ígnea reciente.</p> <p>Tectónico: asociado con circulación profunda de aguas meteóricas a lo largo de sistemas de falla.</p>
Edad-vulcanismo	<p>Este parámetro aplica solamente para los sistemas "volcánicos" (según definición expresada en el punto anterior). Para estos sistemas geotérmicos la edad del vulcanismo proporciona información general sobre las posibles condiciones e intensidad de la fuente de calor. Para tal fin se ha considerado la edad de la actividad más reciente en el complejo volcánico asociado con el recurso geotérmico. Los datos son expresados en millones de años (Ma) y derivados de la información disponible en literatura.</p> <p>Los casos con vulcanismo de edad mayor de 2 Ma son considerados sin significativa contribución de la fuente de calor magmática y clasificados a la par de los sistemas tectónicos.</p>
Temperatura recurso	<p>Resume el conocimiento de las condiciones térmicas del sistema hidrotermal, expresada mediante los parámetros indicados a continuación.</p> <p>Estimada: temperatura del sistema geotermal basada en geotermómetros de aguas y/o gases. Se utilizaron resultados de estudios geoquímicos disponibles en literatura, considerando solamente la información correspondiente a aplicaciones apropiadas y confiables de las técnicas geotermométricas.</p> <p>Medida: indica la temperatura máxima medida en pozos a profundidades > 500 m, cuando disponible. Temperaturas medidas a profundidades menores son reportadas solamente cuando significativas (>100°C).</p>

Temperatura recurso	<p>Clasificación: representa una evaluación resumida, aplicando el criterio técnico de los autores del presente documento, de las condiciones de temperatura más probables del recurso económicamente explotable, haciendo referencia a la clasificación propuesta por Sanyal (2005):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ultra High (UHT) > 300°C • High (HT) 230-300°C • Moderate (MT) 190-230°C • Low (LT) 150-190°C • Very Low (VLT) 100-150°C
Potencial-recurso	<p>Proporciona información sobre la potencialidad de generación eléctrica del recurso geotérmico.</p> <p>Dado que la mayoría de los proyectos geotérmicos en América del Sur se encuentran en una etapa inicial, con perforaciones limitadas o ausentes, las evaluaciones de potencial son comúnmente derivadas de cálculos probabilísticos basados en estimaciones del calor almacenado o de la densidad de potencia (MWe/km²). Estos cálculos proveen estimaciones de confiabilidad y significado variable dependiendo de la calidad y cantidad de información utilizada, así como de los criterios aplicados para estimar la extensión o el volumen del recurso. La aplicación de cálculos probabilísticos hace además que el valor del potencial tiene que ser asociado con una correspondiente probabilidad de ocurrencia, lo cual es un parámetro que no siempre está reportado en literatura. Todo esto hace que los datos publicados para los diferentes proyectos, tengan a menudo significados distintos y no sean directamente comparables entre ellos.</p> <p>Por todas estas razones la información relativa al potencial del recurso ha sido expresada dos diferentes valores:</p> <p>Potencial reportado: indica valores de potencial del recurso encontrados en literatura o proporcionados por el desarrollador del proyecto. Este dato es utilizado solamente para fines de documentación y referencia general, dado que no constituye un parámetro que puede ser utilizado en la comparación entre diferentes proyectos (por las consideraciones arriba mencionadas).</p> <p>Desarrollo probable: valor propuesto por los autores del presente documento, como referencia razonable del posible desarrollo comercial del recurso. El valor se basa en una evaluación global de toda la información disponible sobre el proyecto, y debe de entenderse como una estimación del desarrollo geotermo-eléctrico más probable que pudiera esperarse en el corto-mediano plazo (5-15 años), bajo las mejores condiciones de desarrollo del proyecto.</p>
Calidad-recurso	<p>Este parámetro se refiere a las características físico-químicas de los fluidos geotérmicos y sus posibles implicaciones para la explotación del recurso (incrustación, corrosión, alto contenido de gases no condensables, etc.).</p> <p>Con exclusión de pocos casos que cuentan con pozos que producen fluidos del reservorio geotérmico, la mayoría de los proyectos considerados se encuentra en una etapa temprana en la cual este parámetro puede ser definido solamente de manera aproximada y algo especulativa, principalmente en base al contexto geológico y a las características de las manifestaciones termales en superficie.</p> <p>Por esta razón, en la base de datos se aplica una clasificación basada en tres categorías generales de calidad: alta - intermedia - baja.</p>
Condiciones- sitio	<p>En los casos con información insuficiente para estimar de manera confiable la calidad de los fluidos del reservorio geotérmico se aplicó la clasificación “intermedia”.</p> <p>Esta sección define los principales elementos físicos del territorio y aspectos logísticos del área del proyecto, que tienen implicaciones directas en las actividades de exploración y desarrollo del recurso geotérmico. Se consideraron los siguientes factores:</p> <p>Elevación: reportada como rango de elevación (en m s.n.m.) del área de interés</p>

geotérmico, con particular referencia al sector donde más probablemente se desarrollaría el campo geotérmico.

Clima: definición general de las condiciones climáticas de la zona, con evaluación de las implicaciones que éstas pueden tener sobre las actividades del proyecto. Se utilizaron las siguientes clases:

- Favorable: las condiciones climáticas no implican restricciones para las actividades geotérmicas.
- Moderado: las actividades de exploración y desarrollo geotérmico pueden ser afectadas en ocasiones por alguna limitación de carácter climático.
- Difícil: la situación climática puede determinar limitaciones en las actividades de exploración y desarrollo del proyecto debido a temporadas con condiciones de baja temperatura, vientos fuertes, lluvias fuertes, tormentas eléctricas y nevadas.
- Severo: la situación climática determina una larga temporada de invierno con temperaturas muy bajas, vientos fuertes y/o acumulación de nieve persistente y abundante.

Topografía: define las condiciones morfológicas generales de la zona del proyecto, utilizando la siguiente clasificación:

- Favorable: no implica limitaciones sustanciales para cualquier actividad de exploración y desarrollo del campo geotérmico.
- Moderada: con situaciones localmente desfavorables para el desarrollo de obras e instalaciones geotérmicas, pero de fácil manejo.
- Difícil: terreno montañoso, localmente accidentado con valles profundos. Situaciones que aumentan los costos de infraestructura.
- Severa: territorio muy accidentado, laderas empinadas y/o inestables, espacio limitado para el desarrollo de infraestructura. Situaciones que aumentan significativamente los costos de infraestructura y limitan la viabilidad de un desarrollo geotérmico.

Accesibilidad: presencia de caminos de acceso al área del proyecto. Se indica la distancia (en km), entre el camino pre-existente de acceso vehicular más cercano y el sitio del posible desarrollo geotérmico.

Distancia red transmisión: distancia (en km) entre el sitio de posible instalación de la planta geotérmica y el punto más cercano de interconexión a la red eléctrica nacional.

La definición de este parámetro necesita la ejecución de estudios de interconexión para determinar la opción más viable en función de las características y disponibilidad de recepción de carga del sistema de transmisión eléctrica en la región aledaña al proyecto. Este nivel de información no es generalmente disponible en las etapas tempranas en las cuales se encuentra la mayoría de los proyectos considerados, por lo cual este dato es reportado de forma aproximado y con carácter indicativo.

En casos particulares, la distancia puede ser también referida a un punto local de entrega de energía, cuando exista un mercado específico y "bien definido", como una actividad minera u otra actividad industrial en operación.

5. Entorno institucional, ambiental y de mercado

En esta sección se incluye información acerca de todos los elementos externos al proyecto (no asociados con las condiciones físicas del sitio y del recurso en el subsuelo) que pueden influenciar la ejecución de actividades, condicionar la factibilidad económica, o dificultar el financiamiento del proyecto. Se toman en consideración elementos del contexto regulatorio del sector geotérmico y energético, condiciones del mercado eléctrico y su apertura hacia la geo-electricidad, y condiciones del entorno social y ambiental del área. Los parámetros utilizados se describen a continuación.

Contexto regulatorio e institucional

Esta sección evalúa las condiciones del entorno regulatorio e institucional. Se hace inicialmente una distinción entre los países en los cuales existe apertura a la participación del sector privado (empresas privadas o PPP), y los países donde la explotación de los recursos geotérmicos es reservada para el Estado, a través de empresas públicas.

Cuando existe un contexto que permite y estimula la inversión privada se evalúa la fortaleza del marco regulatorio e institucional correspondiente mediante la siguiente clasificación:

- Muy atractivo: presencia de un marco normativo para la geotermia, claro, bien definido, completo y muy atractivo para la inversión privada.
- Atractivo: existencia de un marco normativo claro y bien definido, adecuado para la inversión privada en energía geotérmica.
- Parcialmente atractivo: existencia de un marco normativo específico para la geotermia, pero que necesita ajustes y mejoras para apoyar de manera eficiente el desarrollo del sector mediante la participación privada.
- Poco atractivo: marco normativo parcial o inapropiado para la geotermia, o con importantes restricciones a la participación privada;
- No atractivo: falta de un marco normativo para las actividades geotérmicas.

Para el caso de los países donde las actividades geotérmicas son en su mayoría reservadas para las instituciones nacionales o empresas controladas por el Estado, se estableció una clase independiente denominada: “Reservado Empresas Públicas”. En estos casos la importancia del marco normativo para regular e incentivar el sector geotérmico es menos relevante.

Condiciones de mercado

En esta sección se evalúan aspectos relevantes del mercado de la energía que pueden afectar a la viabilidad económica y financiera de los proyectos geotérmicos. Se consideran en particular los siguientes factores:

Precio electricidad: con referencia al precio promedio durante los últimos 2-3 años en el mercado eléctrico del sistema interconectado correspondiente, o de mercados locales, cuando existen y son bien definidos (ejemplo complejos mineros aislados, en fase avanzada de desarrollo o en operación).

El impacto del precio de la electricidad sobre la viabilidad de un desarrollo geotérmico depende de varias condiciones que son específicas de cada país y de cada campo geotérmico, lo cual requeriría de un análisis muy detallado de cada situación. Para los fines de la presente evaluación, se determinó este factor con cierta aproximación, tomando como referencia los costos promedios de generación en la industria geotérmica a nivel mundial (ver por ejemplo ESMAP, 2012; Taylor, 2013, IRENA, 2015), y se utilizaron los siguientes criterios de clasificación del precio de la electricidad:

- Muy atractivo: > 0,15 US\$/kWh
- Atractivo: 0,10-0,15 US\$/kWh
- Parcialmente Atractivo: 0,06-0,10 US\$/kWh
- No Atractivo: <0,06 US\$/kWh

Condiciones contratos PPA: en este parámetro se evalúa la facilidad de establecer en el mercado eléctrico contratos de compra-venta de energía (PPA) de largo plazo, los cuales son un requisito fundamental para el financiamiento de inversiones geotérmicas. Este aspecto se clasifica según el criterio siguiente:

- Muy atractivas: PPAs de largo plazo (20 años o más) comúnmente disponibles y fáciles de negociar.
- Atractivas: PPAs de largo plazo (> 15 años), disponibles con algunas dificultades de negociación.
- Parcialmente atractivas: PPAs a largo plazo posiblemente aceptados, pero difíciles de negociar, o aceptados con duraciones menores de 15 años.

Condiciones de mercado	<ul style="list-style-type: none"> • No atractivas: PPAs no disponibles, o negociables solamente para plazos muy cortos (<5 años). <p>Despacho geoelectricidad: este parámetro considera la presencia de eventuales restricciones en la inyección/despacho de generación de carga base (como la geotérmica) en el sistema eléctrico.</p> <ul style="list-style-type: none"> • No hay restricciones: existe una amplia demanda de capacidad de carga base. • Pocas Restricciones: existe demanda de capacidad de carga base, pero potencialmente sujeta a algunas condiciones. • Muchas Restricciones: inyección de carga base en la red probablemente factible, pero bajo restricciones y condiciones específicas. • No Factible: el sistema eléctrico no acepta inyección de carga base adicional. <p>Incentivos económicos: evalúa la presencia y relevancia de incentivos fiscales, tarifarios u de otro tipo, aplicables al desarrollo y operación de proyectos geotérmicos. La situación se clasifica en términos de: muy atractivos-atractivos-insuficientes-inexistentes, en función del efecto estimulante que los incentivos pueden generar para las inversiones geotérmicas, dentro de las condiciones generales del mercado.</p>
Aspectos sociales y ambientales	<p>En esta sección se analiza el contexto social y ambiental de cada proyecto, con particular atención en la identificación de condiciones que pueden limitar su desarrollo (oposición social y/o regulaciones ambientales restrictivas). Para tal fin se establecieron los siguientes parámetros:</p> <p>Contexto social: define la aceptación del proyecto por parte de las comunidades locales, instituciones, organizaciones y la sociedad en general. Se clasifica en términos de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Favorable: proyecto bien aceptado y promovido por el entorno social. • Moderado: potenciales conflictos con el entorno social, manejables. • Difícil: presencia de oposición social. Se esperan procesos de comunicación y negociación largos y potencialmente complejos. • Severo: presencia de oposición social muy fuerte. Acercamiento y negociación muy difícil. <p>Restricciones ambientales: se refiere a la presencia de áreas de conservación natural o sitios protegidos, cuyas regulaciones pueden implicar restricciones o inclusive prohibiciones para el desarrollo geotérmico. Se definen en términos de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ausentes: el área geotérmica se encuentra totalmente fuera de cualquier tipo de área protegida. • Moderadas: el área geotérmica interfiere con zonas protegidas que implican restricciones leves, manejables mediante estudios de evaluación ambiental más detallados, medidas de mitigación más costosas y generalmente gestiones más largas. • Importantes: el área geotérmica interfiere con zonas protegidas que implican restricciones importantes, con procesos de autorización ambiental complejos y largos e implementación de importantes medidas de mitigación. • Severas: presencia de áreas protegidas cuya normativa no permite el desarrollo de instalaciones geotérmicas. <p>Comentarios: se complementan las dos clasificaciones arriba mencionadas con breves notas y comentarios acerca de la situación ambiental y social en el área de cada proyecto.</p>

6. Referencias

Por cada proyecto se indican las referencias bibliográficas, enlaces de información en internet y comunicaciones personales utilizadas en la recopilación de información reportada en la base de datos.

C. Base de datos

Los diferentes componentes de la base de datos se presentan en los cuadros siguientes. La tabla de referencias correspondiente a la lista con detalle de las citaciones bibliográficas se incluye en el Anexo 1.

Cuadro 9
Base de datos de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur.
Identificación de los proyectos y situación legal y administrativa

IDENTIFICACIÓN PROYECTO				SITUACIÓN LEGAL Y ADMINISTRATIVA				
PAÍS	ESTADO, REGIÓN O PROVINCIA	NOMBRE		PROPIEDAD		DERECHOS SOBRE RECURSO GEOTÉRMICO		
		Sistema Geotérmico	Sector	Tipo	Operador	Tipo	Válido Hasta	Nombre
Argentina	Neuquén	Copahue	Las Mellizas	Pública	Provincia del Neuquén (ADI-NQN)	Concesión Minera (Explotación - Explotación)	Indefinido	Las Mellizas de Copahue
Argentina	Neuquén	Domuyo	El Humazo	Pública	Provincia del Neuquén (ADI-NQN)	Concesión Minera (Explotación - Explotación)	Indefinido	Maitena - María Victoria
Argentina	San Juan	Los Despoblados	Los Despoblados	PPP	UTE - EPSE, GASA, MAGSA	Concesión Minera (Explotación - Explotación)	Indefinido	Los Despoblados
Argentina	Jujuy	Tuzgle	Tuzgle	Privada	Geotermia Andina	Concesión Minera (Explotación - Explotación)	Indefinido	Grupo de concesiones con diferentes nombres
Argentina	Salta - Jujuy	Tocomar	Tocomar	Privada	Geotermia Andina	Concesión Minera (Explotación - Explotación)	Indefinido	Grupo de concesiones con diferentes nombres
Bolivia	Pobsi	Laguna Colorada	Sol de Mañana	Pública	Empresa Nacional de Electricidad (ENDE)	Estatal	n.a.	n.a.
Bolivia	Pobsi	Río Empexa	Towa	Pública	No Definido (ENDE?)	Estatal	n.a.	n.a.
Bolivia	Oruro	Sajama	Río Junthuma	Pública	No Definido (ENDE?)	Estatal	n.a.	n.a.
Chile	Región I	Surire	Chiguana	Privada	Energía Andina, S.A.	Exploración	2015	Polloquere 1
Chile	Región I	Pumiri	Polloquere-Licancura	Privada	Transmark Chile - Empresa Nacional de Geotermia	Exploración	2015-2016	Polloquere 2, Licancura 3, Licancura
Chile	Región I	Puchuliza	Puchuliza-Tuja	Privada	Mighty River Power - Energía Andina	Exploración	2016	Puchuliza Sur 1 y 2
Chile	Región II	Apacheta	Cerro Pabellón	Privada	Geotérmica del Norte	Explotación	Indefinido	Apacheta
Chile	Región II	El Tatio	El Tatio-La Torta	Privada	Geotérmica del Norte	Explotación	Indefinido	El Tatio y La Torta
Chile	Región VI	Tinguiririca	Tinguiririca	Privada	Energía Andina	Explotación	Indefinido	Tinguiririca
Chile	Región VII	Calabozo	Lloll	Privada	Geotérmica del Norte	Explotación (en proceso)	n.a.	Calabozo
Chile	Región VII	Pellado	Mariposa	Privada	Energy Development Corporation - Alterra Power Inc.	Explotación	Indefinido	L. Maule - Pellado
Chile	Región VIII	Chillán	Chillán	Privada	Empresa Nacional de Geotermia	Explotación	Indefinido	Chillán
Chile	Región VIII-IX	Tolhuaca	Curacautín	Privada	Mighty River Power	Explotación	Indefinido	San Gregorio
Chile	Región X	Cordón Caulle	Cordón Caulle	n.a.	n.a.	Sin Concesión	n.a.	n.a.
Colombia	Nariño	Azufral	Azufral	Pública	Servicio Geológico Colombiano	Sin Concesión	n.a.	n.a.
Colombia	Caldas	Ruiz	NW Sectbr	Pública - Privada	EPM/CHEC e ISAGEN	Sin Concesión	n.a.	n.a.
Colombia	Boyacá	Paipa	Paipa	Pública	Servicio Geológico Colombiano	Sin Concesión	n.a.	n.a.
Colombia / Ecuador	Nariño / Carchi	Tufño	Chiles-Cerro Negro	Pública - Privada	ISAGEN - CELEC	Estatal	n.a.	n.a.
Ecuador	Imbabura	Chachimbiro	Chachimbiro	Pública	CELEC	Estatal	n.a.	n.a.
Ecuador	Napo	Chacana	Cachiyacu-Jamanco	Pública	CELEC	Estatal	n.a.	n.a.
Perú	Ayacucho	Puquio	Puquio	Pública	Eco Energy	Exploración	2017	Geronta I and II
Perú	Arequipa	Pinchollo	Pinchollo	Pública	Energy Development Corporation	Exploración	2017	Achumani
Perú	Moquegua	Ticsani	Calacoa-Putina	Pública	Energy Development Corporation	Exploración	2016	Quellapacheta
Perú	Tacna	Tutupaca	Tutupaca	No Definida	No Definido	Sin Concesión	n.a.	n.a.
Perú	Moquegua	Coollo	Títire-Arunlaya	No Definida	No Definido	Sin Concesión	n.a.	n.a.
Perú	Moquegua-Puno	Crucero	Crucero	No Definida	No Definido	Sin Concesión	n.a.	n.a.
Perú	Puno	Pinaya	Pinaya	Privada	Eco Energy	Exploración	2017	Pinaya I, II, III, IV, V, VI
Perú	Tacna	Calientes	Calientes	No Definida	No Definido	Sin Concesión	n.a.	n.a.
Perú	Tacna	Ancoccollo	Ancoccollo	No Definida	No Definido	Sin Concesión	n.a.	n.a.
Perú	Tacna	Borateras	Borateras	No Definida	No Definido	Sin Concesión	n.a.	n.a.
Perú	Tacna	Casiri	Chungara-Kallapuma	No Definida	No Definido	Sin Concesión	n.a.	n.a.
Venezuela	Sucre	El Pilar-Casanay	Las Minas - Mundo Nuevo	Pública	No Definido (CORPOELEC?)	Estatal	n.a.	n.a.

Cuadro 10
Base de datos de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur.
Etapa de desarrollo

IDENTIFICACIÓN PROYECTO				ETAPA DE DESARROLLO							
PAÍS	ESTADO, REGIÓN O PROVINCIA	NOMBRE		ESTADO PROYECTO	ETAPA PROYECTO	PERFORACIONES					
		Sistema Geotérmico	Sector			Pozo Gradiente	Diamantino	Diámetro Reducido	Diámetro Estándar	Total Pozos	Rango Profundidad
Argentina	Neuquén	Copahue	Las Mellizas	Suspendido	Factibilidad	12	0	0	4	16	50-1.414
Argentina	Neuquén	Domuyo	El Humazo	Inactivo	Exploración Superficie	13	0	0	0	13	80-366
Argentina	San Juan	Los Despoblados	Los Despoblados	Suspendido	Exploración Superficie	5	0	0	0	5	214-250
Argentina	Jujuy	Tuzgle	Tuzgle	Activo	Exploración Superficie	18	0	0	0	18	60-172
Argentina	Salta - Jujuy	Tocomar	Tocomar	Suspendido	Reconocimiento	0	0	0	0	0	n.a.
Bolivia	Potosí	Laguna Colorada	Sol de Mañana	Activo	Desarrollo	0	0	0	6	6	1.180-1.726
Bolivia	Potosí	Río Empexa	Towa	Inactivo	Exploración Superficie	6	0	0	0	6	60-165
Bolivia	Oruro	Sajama	Río Junthuma	Inactivo	Reconocimiento	0	0	0	0	0	n.a.
Chile	Región I	Surire	Chiguana	Suspendido	Exploración Superficie	0	0	0	0	0	n.a.
Chile	Región I	Pumiri	Polloquere-Licancura	Activo	Perforación de Prueba	0	2	0	0	2	No Publicado (< 1.000)
Chile	Región I	Puchuldiza	Puchuldiza-Tuja	Suspendido	Perforación Exploratoria	8	1	6	0	15	400-1.157
Chile	Región II	Apacheta	Cerro Pabellón	Activo	Desarrollo	1	1	0	4	6	180-2.000
Chile	Región II	El Tallo	El Tallo-La Torta	Inactivo	Factibilidad	0	0	6	8	14	571-1.900
Chile	Región VI	Tinguiririca	Tinguiririca	Suspendido	Perforación de Prueba	0	1	0	0	1	815
Chile	Región VII	Calabozo	Lloli	Suspendido	Perforación de Prueba	0	1	0	0	1	900?
Chile	Región VII	Pellado	Mariposa	Activo	Perforación de Prueba	0	3	0	0	3	659-911
Chile	Región VIII	Chillán	Chillán	Suspendido	Perforación de Prueba	1	1	0	0	2	274-900?
Chile	Región VIII-IX	Tolhuaca	Curacautín	Suspendido	Perforación Exploratoria	0	1	1	2	4	1.073-2.475
Chile	Región X	Cordón Caulle	Cordón Caulle	Inactivo	Reconocimiento	0	0	0	0	0	n.a.
Colombia	Nariño	Azufral	Azufral	Activo	Exploración Superficie	0	0	0	0	0	n.a.
Colombia	Caldas	Ruiz	NW Sector	Activo	Perforación de Prueba	3	0	1	0	4	300-1.468
Colombia	Boyacá	Paipa	Paipa	Activo	Exploración Superficie	0	0	0	0	0	n.a.
Colombia / Ecuador	Nariño / Carchi	Tuñiño	Chiles-Cerro Negro	Activo	Exploración Superficie	0	1	0	0	1	554
Ecuador	Imbabura	Chachimbiro	Chachimbiro	Activo	Exploración Superficie	0	0	0	0	0	n.a.
Ecuador	Napo	Chacana	Cachiyacu-Jamanco	Activo	Exploración Superficie	0	0	0	0	0	n.a.
Perú	Ayacucho	Puquio	Puquio	Suspendido	Reconocimiento	0	0	0	0	0	n.a.
Perú	Arequipa	Pinchollo	Pinchollo	Activo	Exploración Superficie	0	0	0	0	0	n.a.
Perú	Moquegua	Ticsani	Calacoa-Putina	Activo	Exploración Superficie	0	0	0	0	0	n.a.
Perú	Tacna	Tutupaca	Tutupaca	Inactivo	Exploración Superficie	0	0	0	0	0	n.a.
Perú	Moquegua	Coollo	Titre-Aruntaya	Inactivo	Reconocimiento	0	0	0	0	0	n.a.
Perú	Moquegua-Puno	Crucero	Crucero	Inactivo	Reconocimiento	0	0	0	0	0	n.a.
Perú	Puno	Pinaya	Pinaya	Suspendido	Reconocimiento	0	0	0	0	0	n.a.
Perú	Tacna	Calientes	Calientes	Inactivo	Exploración Superficie	0	0	0	0	0	n.a.
Perú	Tacna	Ancocollo	Ancocollo	Inactivo	Exploración Superficie	0	0	0	0	0	n.a.
Perú	Tacna	Borateras	Borateras	Inactivo	Exploración Superficie	0	0	0	0	0	n.a.
Perú	Tacna	Casiri	Chungara-Kallapuma	Inactivo	Reconocimiento	0	0	0	0	0	n.a.
Venezuela	Sucre	El Pilar-Casanay	Las Minas - Mundo Nuevo	Inactivo	Reconocimiento	0	0	0	0	0	n.a.

Cuadro 11
Base de datos de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur.
Etapa de desarrollo

IDENTIFICACIÓN PROYECTO				CARACTERÍSTICAS Y UBICACIÓN DEL RECURSO											
PAÍS	ESTADO, REGIÓN O PROVINCIA	NOMBRE		TIPO DE SISTEMA	EDAD VULCANISMO (Ma)	TEMPERATURA RECURSO (°C)		Clasificación	POTENCIAL RECURSO (MWe)		CALIDAD RECURSO	CONDICIONES SITIO			
		Sistema Geotérmico	Sector			Estimada	Medida		Reportado	Desarrollo Probable		Elevación	Clima	Topografía	Accesibilidad
Argentina	Neuquén	Copahue	Las Mellizas	Volcánico	< 0,01	250-260	250	HT	> 30	80-100	Alta	Severo	Favorable	< 5	45
Argentina	Neuquén	Domuyo	El Humazo	Volcánico	0,11	180-225	172	MT	falta dats	40-50	Intermedia	Severo	Moderada-Favorable	< 5	85
Argentina	San Juan	Los Despoblados	Los Despoblados	Tectónico	2,1	140-180	n.a.	VLT-LT	20	10-15	Intermedia	Difícil-Severo	Favorable	< 5	9
Argentina	Jujuy	Tuzgle	Tuzgle	Volcánico	0,01	130-140	n.a.	VLT	falta dats	10-15	Intermedia	Difícil	Favorable	< 5	16
Argentina	Salta - Jujuy	Tocomar	Tocomar	Tectónico-Volcánico	0,5	130-140	n.a.	VLT	falta dats	10-15	Intermedia	Difícil	Favorable	< 5	< 5
Bolivia	Pobosí	Laguna Cobrada	Sol de Mañana	Volcánico	< 0,1	280-300	250-260	HT	> 120	120-150	Alta	Difícil	Favorable	< 5	170
Bolivia	Pobosí	Rb Empexa	Towa	Volcánico	< 0,01	180-200	125	LT-MT	10-15	10-20	Intermedia	Moderado-Difícil	Favorable	< 5	145
Bolivia	Oruro	Sejama	Rb Junfuma	Volcánico	< 0,1	230-250	n.a.	HT	falta dats	50-60	Intermedia	Difícil	Favorable	5-6	160-200
Chile	Región I	Surre	Chiguana	Volcánico	-1,0	230-260	n.a.	HT	50-140	60-80	Alta	Difícil	Favorable	< 5	115
Chile	Región I	Pumiri	Polloquere-Licanura	Volcánico	-1,0	240-260	No Publicada	HT	120-240	50-70	Alta	Difícil	Favorable	< 5	100
Chile	Región I	Puchudiza	Puchudiza-Tuja	Volcánico	0,9	220-270	201	MT-HT	30 -190	30-50	Alta	Difícil	Favorable	< 5	75
Chile	Región II	Apacheta	Cerro Pabelón	Volcánico	0,13-0,05	≥ 250	260	HT	50-140	80-100	Alta	Difícil	Favorable	< 5	73
Chile	Región II	El Tafo	El Tafo-La Torta	Volcánico	0,04	250-300	256	HT	100-250	120-150	Alta	Difícil	Favorable-Moderada	< 5	95
Chile	Región VI	Tinguiririca	Tinguiririca	Volcánico	< 0,01	230-300	233	HT	90-200	50-70	Alta	Severo	Difícil	12	70-80
Chile	Región VII	Calabozo	Lolli	Volcánico	< 0,01	235-300	No Publicada	HT	80-200	50-100	Alta	Severo	Difícil-Severa	50-60	70-80
Chile	Región VII	Pellado	Mariposa	Volcánico	< 0,01	220-270	205	HT	320	60-80	Alta	Severo	Favorable-Moderada	12	25
Chile	Región VIII	Chillán	Chillán	Volcánico	< 0,01	200	198	MT	30-100	20-30	Intermedia	Severo	Severa	< 5	75
Chile	Región VIII-X	Tohuaca	Curacaufin	Volcánico	< 0,01	220-250	290	HT	40-150	35-70	Alta	Severo	Difícil	10	68
Chile	Región X	Cordón Caulle	Cordón Caulle	Volcánico	< 0,01	160-300	n.a.	MT-HT	250	100-150	Intermedia	Severo	Moderado-Favorable	10-15	60

Cuadro 12
Base de datos de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur. Características y ubicación del recurso. Colombia-Ecuador-Perú-República Bolivariana de Venezuela

IDENTIFICACIÓN PROYECTO				CARACTERÍSTICAS Y UBICACIÓN DEL RECURSO												
PAÍS	ESTADO, REGIÓN O PROVINCIA	NOMBRE		TIPO DE SISTEMA	EDAD VULCANISMO (Ma)	TEMPERATURA RECURSO (°C)		Clasificación	Potencial Reportado	Desarrollo Probable	CALIDAD RECURSO	CONDICIONES SITIO			Distancia Red Transmisión	
		Sistema Geotérmico	Sector			Estimada	Medida					Elevación	Clima	Topografía		Accesibilidad
Colombia	Nariño	Azufral	Azufral	Volcánico	<0,01	220-240	n.a.	MT-HT	falta datos	40-60	Intermedia	3.400-3.800	Moderado	Moderada	5-10	30-50
Colombia	Caldas	Ruiz	NW Sector	Volcánico	<0,01	250-260	200	HT	100	60-80	Alta-Intermedia	3.200-4.000	Moderado	Difícil	20-25	30
Colombia	Boyacá	Paipa	Paipa	Volcánico	<1,9	175-230	n.a.	LT-MT	falta datos	20-30	Intermedia-Baja	2.500-2.650	Favorable	Favorable	<5	10
Colombia / Ecuador	Nariño / Carchi	Tufiño	Chiles-Cerro Negro	Volcánico	0,160	230	No Medida	MT	138	40-50	Intermedia	3.800-4.200	Moderado	Moderada	<5	15
Ecuador	Imbabura	Chachimburo	Chachimburo	Volcánico	<0,01	225-260	n.a.	MT-HT	81	40-50	Alta	3.400-3.800	Favorable-Moderado	Difícil	5-10	20-25
Ecuador	Napo	Chacana	Cachiyacu-Jamanco	Volcánico	<0,01	180-230	n.a.	LT-MT	52	20-25	Intermedia	3.200-4.000	Favorable-Moderado	Favorable	5-20	20
Perú	Ayacucho	Puquio	Puquio	Tecónico	n.a.	210	n.a.	MT	34	15-20	Intermedia	3.900-4.200	Moderado	Favorable	<5	113
Perú	Arequipa	Pinchollo	Pinchollo	Volcánico	0,2-0,5	>208	n.a.	HT	163	60-80	Alta	4.300-4.900	Difícil	Favorable-Difícil	<5	70
Perú	Moquegua	Ticsani	Calacoa-Puñna	Volcánico	<0,01	180-240	n.a.	MT-HT	108	40-60	Intermedia	3.800-5.000	Difícil	Difícil-Severa	<5	65
Perú	Tacna	Tulupaca	Tulupaca	Volcánico	<0,01	215	n.a.	MT	114	50-70	Intermedia	4.200-4.700	Difícil	Favorable	<5	22
Perú	Moquegua	Coolo	Titre-Arunaya	Tecónico	n.a.	217	n.a.	LT-MT	40	15-20	Intermedia	4.300-4.400	Difícil	Favorable	<5	117
Perú	Moquegua-Puno	Crucero	Crucero	Tecónico	n.a.	216	n.a.	MT	80	30-40	Alta	4.500-4.600	Difícil	Favorable	<5	117
Perú	Puno	Pinaya	Pinaya	Tecónico	n.a.	190	n.a.	LT-MT	37	15-20	Intermedia	4.300-4.400	Difícil	Favorable	<5	70
Perú	Tacna	Calentes	Calentes	Volcánico	<0,1	219	n.a.	MT	100	60-80	Alta	4.200-4.500	Difícil	Favorable-Moderada	<5	30
Perú	Tacna	Anococollo	Anococollo	Volcánico	<0,1	219	n.a.	MT	98	60-80	Alta	4.100-4.300	Difícil	Favorable	<5	22
Perú	Tacna	Borateras	Borateras	Volcánico	<0,1	223	n.a.	MT	40	50-60	Alta	4.300-4.600	Difícil	Favorable	<5	75
Perú	Tacna	Casiri	Chungara-Kallepuma	Volcánico	<0,1	210	n.a.	MT	84	50-60	Alta	4.200-4.500	Difícil	Favorable	<5	75
Venezuela	Sucra	El Pilar-Casamay	Las Minas - Mundo Nuevo	Tecónico	n.a.	220-300	n.a.	MT-HT	134-163	40-50	Intermedia-Baja	80-400	Favorable	Favorable	<5	40

Cuadro 13
Base de datos de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur. Entorno institucional, ambiental y de mercado. Argentina-Chile.

IDENTIFICACIÓN PROYECTO			ENTORNO INSTITUCIONAL AMBIENTAL Y DE MERCADO									
PAIS	ESTADO, REGIÓN O PROVINCIA	NOMBRE		CONTEXTO REGULATORIO & INSTITUCIONAL	CONDICIONES MERCADO			Incentivos Económicos	Contexto Social	Restricciones Ambientales	Comentarios	
		Sistema Geotérmico	Sector		Precio Electricidad	Condiciones Contratos PPA	Despacho electricidad					
Argentina	Neuquén	Copahue	Las Mellizas	Poco Atractivo	No Atractivo	No Atractivo	No Restricciones	Atractivos	Difícil	Moderadas	Área ubicada al interior del Área Protegida Provincial Copahue, en proximidad de importantes centros turísticos (Cavihué, Copahue). Presencia de población indígena.	
Argentina	Neuquén	Domuyo	El Humazo	Poco Atractivo	No Atractivo	No Atractivo	No Restricciones	Atractivos	Moderado	Moderadas	Sitio muy remoto, ubicado al interior de la Reserva Provincial de Flora Domuyo. Poblado más cercano (Varvaco) a 30 km de distancia.	
Argentina	San Juan	Los Des poblados	Los Des poblados	Poco Atractivo	Muy Atractivo	Parcialmente Atractivos	No Restricciones	Atractivos	Favorable	Ausentes	Sitio muy remoto en la alta Cordillera Andina. Presencia de importantes actividades de explotación minera (Minas Veladero y Pascua-Lama).	
Argentina	Jujuy	Tuzgle	Tuzgle	Poco Atractivo	Muy Atractivo	Muy Atractivo	No Restricciones	Atractivos	Favorable	Ausentes	Sitio remoto en la Puna Argentina, alejado de centros poblados.	
Argentina	Salta - Jujuy	Toconar	Toconar	Poco Atractivo	Muy Atractivo	Muy Atractivo	No Restricciones	Atractivos	Favorable	Ausentes	Sitio remoto en la Puna Argentina, alejado de centros poblados.	
Bolivia	Potosí	Laguna Colorada	Sol de Mañana	Reservado Empresas Públicas	No Atractivo	No Atractivo	No Restricciones	Inexistentes	Favorable	Moderadas	Sitio remoto en el Altiplano de los Andes, comprendido entre el Monumento Natural Salar de Reserva Nacional de Fauna Andina Eduardo Avaroa.	
Bolivia	Potosí	Río Empexa	Towa	Reservado Empresas Públicas	No Atractivo	No Atractivo	No Restricciones	Inexistentes	Falta Información	Ausentes	Sitio remoto y deshabitado en el Altiplano de los Andes, con minas de azufre abandonadas.	
Bolivia	Oruro	Sajama	Río Junthuma	Reservado Empresas Públicas	No Atractivo	No Atractivo	No Restricciones	Inexistentes	Falta Información	Importantes	Sitio remoto, pero con buen acceso, en el Altiplano de los Andes, relativamente alejado de centros poblados. Ubicado al interior del Parque Nacional Sajama.	
Chile	Región I	Surire	Chiguana	Atractivo	Parcialmente Atractivo	Parcialmente Atractivos	No Restricciones	Insuficientes	Severo	Moderadas	Sitio remoto en el Altiplano de los Andes, comprendido entre el Monumento Natural Salar de Surire (al N) y la Reserva Nacional Las Vucañas (al SE). Presencia de territorios indígenas.	
Chile	Región I	Pumiri	Polloquere-Licanura	Atractivo	Parcialmente Atractivo	Parcialmente Atractivos	No Restricciones	Insuficientes	Moderado	Ausentes	Sitio remoto en la alta Cordillera Andina. Presencia de territorios indígenas.	
Chile	Región I	Puchuliza	Puchuliza-Tuja	Atractivo	Parcialmente Atractivo	Parcialmente Atractivos	No Restricciones	Insuficientes	Moderado	Moderadas	Sitio remoto en la alta Cordillera Andina, ubicado al borde del Parque Nacional Isituga.	
Chile	Región II	Apacheta	Cerro Pabelón	Atractivo	Parcialmente Atractivo	Parcialmente Atractivos	No Restricciones	Insuficientes	Favorable	Ausentes	Sitio remoto en la Alta Cordillera Andina, muy alejado de centros poblados. Presencia de instalaciones de extracción hídrica para uso minero en la zona de Calama.	
Chile	Región II	El Tafo	El Tafo-La Torta	Atractivo	Parcialmente Atractivo	Parcialmente Atractivos	No Restricciones	Insuficientes	Severo	Moderadas	Sitio remoto en la Alta Cordillera Andina. Campo geotérmico asociado con llamativas manifestaciones lermates que constituyen un atractivo turístico de nivel internacional.	
Chile	Región VI	Tinguiririca	Tinguiririca	Atractivo	Atractivo - Muy Atractivo	Parcialmente Atractivos	No Restricciones	Insuficientes	Favorable	Ausentes	Proyecto ubicado en la Cordillera Andina, en la parte alta de la ladera del Volcán Tiniririca, muy alejado de centros poblados. Territorio controlado por pocos propietarios privados.	
Chile	Región VII	Calibozo	Lolli	Atractivo	Atractivo - Muy Atractivo	Parcialmente Atractivos	No Restricciones	Insuficientes	Favorable	Ausentes	Sitio muy remoto y de difícil acceso en un ancho valle de la alta Cordillera Andina, en territorio controlado por pocos propietarios privados.	
Chile	Región VII	Pellado	Mariposa	Atractivo	Atractivo - Muy Atractivo	Parcialmente Atractivos	No Restricciones	Insuficientes	Favorable	Ausentes	Proyecto ubicado en un plateau volcánico de la alta Cordillera Andina, en el flanco septentrional del Volcán Pellado. Territorio controlado por pocos propietarios privados.	
Chile	Región VIII	Chillán	Chillán	Atractivo	Atractivo - Muy Atractivo	Parcialmente Atractivos	No Restricciones	Insuficientes	Difícil	Moderadas	Zona en parte ocupada por un complejo turístico; con canchales de esquí y centros lermates.	
Chile	Región VIII-IX	Tohuaca	Curacautín	Atractivo	Atractivo - Muy Atractivo	Parcialmente Atractivos	No Restricciones	Insuficientes	Favorable	Ausentes	Proyecto ubicado en la parte alta del flanco NW del Volcán Tohuaca, poco altera del borde de la Reserva Nacional Mañatubal. Territorio controlado por pocos propietarios privados.	
Chile	Región X	Cordón Caulle	Cordón Caulle	Atractivo	Atractivo - Muy Atractivo	Parcialmente Atractivos	No Restricciones	Insuficientes	Difícil	Severas	Área geotérmica ubicada en sector remoto, sin accesos por carreteras, y alejado al interior del Parque Nacional Puyehue.	

Cuadro 14
Base de datos de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur. Entorno institucional, ambiental y de mercado.
Colombia-Ecuador-Perú-República Bolivariana de Venezuela

IDENTIFICACIÓN PROYECTO			ENTORNO INSTITUCIONAL AMBIENTAL Y DE MERCADO									
PAIS	ESTADO, REGION O PROVINCIA	NOMBRE		CONTEXTO REGULATORIO & INSTITUCIONAL	CONDICIONES MERCADO			ASPECTOS SOCIALES Y AMBIENTALES			Comentarios	
		Sistema Geotérmico	Sector		Precio Electricidad	Condiciones Contratos PPA	Despacho Geoelectricidad	Incentivos Económicos	Contexto Social	Restricciones Ambientales		
Colombia	Nariño	Azufra	Azufra	No Atractivo	No Atractivo - Parcialmente	Atractivas	No Restricciones	Atractivos	Severo	Moderadas	Presencia de 5 reservas indígenas y sitios sagrados para la población indígena local. Zona de conservación forestal regional y reserva natural. Fuente oposición social indígena.	
Colombia	Caldas	Ruiz	NW Sector	No Atractivo	No Atractivo - Parcialmente	Atractivas	No Restricciones	Atractivos	Favorable	Importantes	Area en proximidad del Parque Natural Nacional Los Nevados. Posiblemente el sector de interés para el desarrollo geotérmico se extiende también al interior del Parque.	
Colombia	Boyacá	Paipa	Paipa	No Atractivo	No Atractivo - Parcialmente	Atractivas	No Restricciones	Atractivos	Moderado	Ausentes	Sector rural en las afueras de la ciudad de Paipa (aprox. 5 km al sur). Fuentes termales utilizadas para bañeros termales y constituyen un importante atractivo turístico.	
Colombia / Ecuador	Nariño / Cauca	Tuñifo	Chiles-Cerro Negro	No Atractivo / Reservado Empresas	Parcialmente Atractivo	No Atractivas	No Restricciones	Atractivos/ Insuficientes	Difícil-Severo	Moderadas	Abarca parte de las reservas Ecológicas 'Volcán Cumbales-Chiles' (en Colombia) y 'El Ángel' (en Ecuador). Situación social compleja, particularmente en el lado colombiano.	
Ecuador	Imbabura	Chachimburo	Chachimburo	Reservado Empresas Públicas	Parcialmente Atractivo	No Atractivas	No Restricciones	Insuficientes	Moderado	Moderadas	Sitio ubicado en la parte alta del complejo volcánico de Chachimburo, sobre el borde de la Reserva Natural Cotacachi - Cayapas	
Ecuador	Napo	Chacana	Cachiyacu-Jamanco	Reservado Empresas Públicas	Parcialmente Atractivo	No Atractivas	No Restricciones	Insuficientes	Moderado-Difícil	Importantes	Conjunto de áreas geotérmicas ubicadas en sectores algo remotos, al interior de la Reserva Ecológica Coca-Cayambe.	
Perú	Ayacucho	Puquio	Puquio	Parcialmente Atractivo	No Atractivo	Parcialmente Atractivas	No Restricciones	Insuficientes	Favorable	Ausentes	Sitio de relativamente fácil acceso, 15 km al NE de la ciudad de Puquio, sin aparentes problemas ambientales y sociales	
Perú	Arequipa	Pindollo	Pindollo	Parcialmente Atractivo	No Atractivo	Parcialmente Atractivas	No Restricciones	Insuficientes	Favorable	Ausentes	Sitio al interior del Valle del Colca, alejado de centros poblados. En el Valle del Colca existe una importante actividad turística.	
Perú	Moquegua	Ticsani	Calacoa-Pultra	Parcialmente Atractivo	No Atractivo	Parcialmente Atractivas	No Restricciones	Insuficientes	Favorable	Ausentes	Proyecto ubicado en el flanco septentrional del Volcán Ticsani, abarcando sectores con morfología abrupta. Zona geotérmica alejada de centros poblados.	
Perú	Tacna	Tupaca	Tupaca	Parcialmente Atractivo	No Atractivo	Parcialmente Atractivas	No Restricciones	Insuficientes	Moderado	Ausentes	Zona geotérmica abarca el macizo del Volcán Tupaca. Los sectores de mayor interés se encuentran alejados de centros poblados, pero en zonas de muy fácil acceso.	
Perú	Moquegua	Coolo	Titre-Arunlaya	Parcialmente Atractivo	No Atractivo	Atractivas	No Restricciones	Insuficientes	Moderado	Ausentes	Zona en proximidad de los poblados de Titre y Arunlaya. Las manifestaciones termales de Coolo son consideradas un monumento natural y representan una atracción turística.	
Perú	Moquegua-Puno	Crucero	Crucero	Parcialmente Atractivo	No Atractivo	Parcialmente Atractivas	No Restricciones	Insuficientes	Severo	Ausentes	Sitio con morfología muy favorable y fácil acceso en el altiplano del sur de Perú. Algunas de las comunidades aymaras de la zona han mostrado fuerte oposición al proyecto geotérmico.	
Perú	Puno	Phaya	Phaya	Parcialmente Atractivo	No Atractivo	Parcialmente Atractivas	No Restricciones	Insuficientes	Moderado	Ausentes	Sitio con morfología favorable y relativamente fácil acceso. Contexto social políticamente sensible.	
Perú	Tacna	Callentes	Callentes	Parcialmente Atractivo	No Atractivo	Parcialmente Atractivas	No Restricciones	Insuficientes	Moderado	Severas	Proyecto al interior de la Zona de Conservación Regional Vilacota-Maure. Manifestaciones termales de interés turístico. Contexto social sensible.	
Perú	Tacna	Anococollo	Anococollo	Parcialmente Atractivo	No Atractivo	Parcialmente Atractivas	No Restricciones	Insuficientes	Moderado	Severas	Proyecto localizado al interior de la Zona de Conservación Regional Vilacota-Maure, la cual no contempla el desarrollo de instalaciones geotérmicas. Contexto social sensible.	
Perú	Tacna	Borabaras	Borabaras	Parcialmente Atractivo	No Atractivo	Parcialmente Atractivas	No Restricciones	Insuficientes	Moderado	Severas	Proyecto localizado al interior de la Zona de Conservación Regional Vilacota-Maure, la cual no contempla el desarrollo de instalaciones geotérmicas. Contexto social sensible.	
Perú	Tacna	Casiri	Chungara-Kallapuma	Parcialmente Atractivo	No Atractivo	Parcialmente Atractivas	No Restricciones	Insuficientes	Moderado	Severas	Proyecto localizado al interior de la Zona de Conservación Regional Vilacota-Maure, la cual no contempla el desarrollo de instalaciones geotérmicas. Contexto social sensible.	
Venezuela	Sure	El Pilar-Casamay	Las Minas-Mundo Nuevo	Reservado Empresas Públicas	No Atractivo	Parcialmente Atractivas	No Restricciones	Inexistentes	Favorable	Ausentes	Sitio con morfología favorable y relativamente fácil acceso. Contexto social políticamente sensible.	

III. Características del sector geotermo-eléctrico de América del Sur

La información contenida en la Base de Datos presentada en el capítulo anterior se presta para diferentes elaboraciones que permiten sintetizar la situación actual y las perspectivas del sector geotermo-eléctrico en América del Sur. En este capítulo se analizan primero los aspectos generales, que caracterizan el sector a nivel regional, y luego se propone un sistema de evaluación y clasificación de los diferentes proyectos incluidos en la Base de Datos.

A. Situación regional

En esta sección se analizan diferentes componentes de la Base de Datos, con el fin de identificar aspectos relevantes que pueden ser de utilidad para entender la situación general y contribuir a la orientación y optimización de acciones de fomento del sector geotermo-eléctrico en América del Sur.

1. Estado de la investigación geotérmica

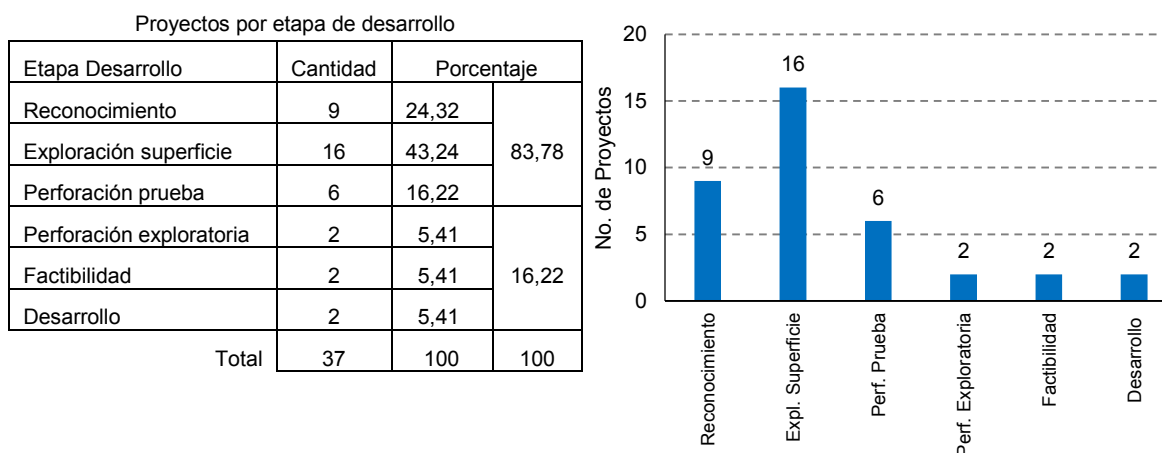
El análisis general del sector geotérmico en América del Sur, presentado en el capítulo I indica que en los países andinos han sido identificadas por lo menos 215 áreas de interés geotérmico (cuadro 1). Entre todos los países se lograron seleccionar en este estudio 37 proyectos, que cuentan con perspectivas concretas y documentadas de contener un recurso apto para el desarrollo geotermo-eléctrico comercial (capítulos I y II). Estos proyectos representan aproximadamente el 17% del total de áreas geotérmicas identificadas.

Cabe observar que los 37 proyectos seleccionados corresponden en su mayoría a prospectos geotérmicos “evidentes”, con manifestaciones superficiales bien desarrolladas, que permiten evaluar las perspectivas de uso del recurso ya en etapas tempranas de exploración. Entre las aproximadamente 180 áreas restantes hay situaciones de vario tipo, variables entre prospectos investigados que no dieron resultados favorables para uso eléctrico (pocos), áreas que no han sido todavía suficientemente estudiadas, y áreas con pocas expresiones termales en superficie, que necesitan inversiones en investigaciones más avanzadas (geofísicas y perforaciones) para determinar las posibilidades de que exista un recurso de interés y sus expectativas de uso.

La significativa diferencia entre el número de áreas geotérmicas conocidas (al menos 215) y el número de proyectos que se han identificado con perspectivas concretas de uso eléctrico (37), pone en todo caso en evidencia que el nivel de investigación de las potencialidades geotermo-eléctricas en América del Sur es en general limitado. En la mayoría de los países no existen estudios recientes de evaluación integral del recurso geotérmico a nivel nacional; de hecho, solamente Perú y Ecuador cuentan con un plan nacional que identifica y caracteriza las perspectivas de desarrollo de sus áreas geotérmicas.

La situación específica de los 37 proyectos incluidos en la base de datos evidencia ulteriormente el limitado avance de la exploración geotérmica en la región. En el Gráfico 4 se ilustra la distribución de los proyectos en función de su etapa de desarrollo.

Gráfico 4
Distribución de proyectos en función de la etapa de desarrollo



Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la mayoría de los proyectos (el 68%) se encuentran en fases iniciales de exploración (reconocimiento o exploración de superficie), mientras que solamente el 32% cuenta con algún tipo de perforación dirigida a explorar directamente el recurso (con profundidad mayor de 500 m). Los proyectos que cuentan con un efectivo conocimiento del recurso mediante perforaciones de diámetro comercial estándar, es decir los que se encuentran en etapa de perforación exploratoria, factibilidad o desarrollo, representan solo el 16% de los casos (6 proyectos).

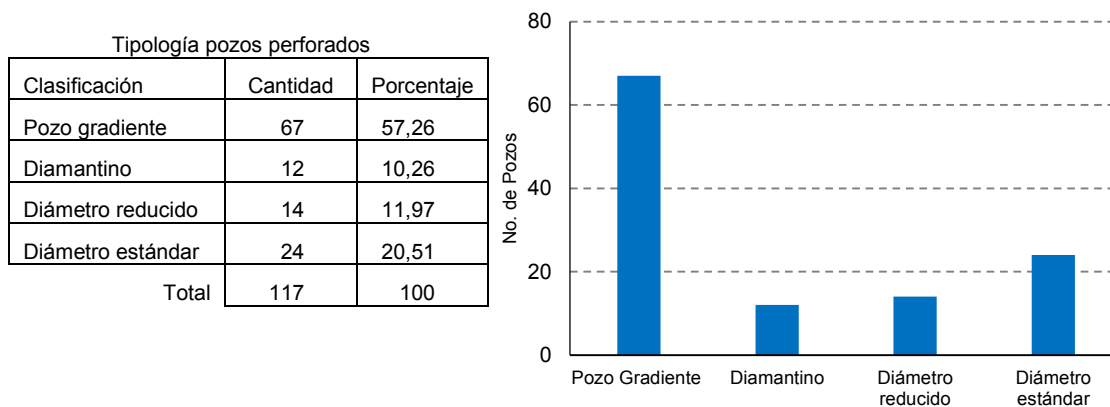
Analizando más en detalle la tipología de los pozos perforados, se observa en el gráfico 5 que, de conformidad con el nivel de exploración poco avanzado que se comentó anteriormente, en un total de 117 pozos inventariados¹⁶⁷, la mayoría (57 %) son perforaciones de gradiente térmico a profundidades inferiores a los 500 m (generalmente <300 m), mientras que los pozos restantes se distribuyen uniformemente entre pozos de pequeño diámetro (22% - diamantinos o diámetro reducido, a profundidades generalmente alrededor de los 1.000 m) y pozos de diámetro estándar (20%, presentes en sólo 5 proyectos, ver cuadro 9).

No todos los países de la región han tenido el mismo grado de avance con la perforación geotérmica. En el gráfico 6 se reporta la distribución de pozos según tipología y por país. Es interesante observar que solamente Chile, Argentina y Bolivia han realizado perforaciones de diámetro comercial estándar, y entre estos países solamente Chile ha experimentado con la aplicación de las varias opciones de perforación exploratoria. En los otros países las actividades de perforación han sido muy limitadas o ausentes. Este factor es independiente del número de proyectos disponibles, porque por ejemplo Perú y

¹⁶⁷ El total de pozos inventariados no corresponde al total de pozos perforados en la región, que superan los 120. Existen algunos proyectos, particularmente en Chile, que a pesar de haber sido objeto de perforación, no están incluidos en la Base de Datos por no presentar, según el juicio de los autores del presente documento, suficiente evidencia de un recurso apto para uso eléctrico, o porque los resultados de la exploración no están disponibles en medios públicos.

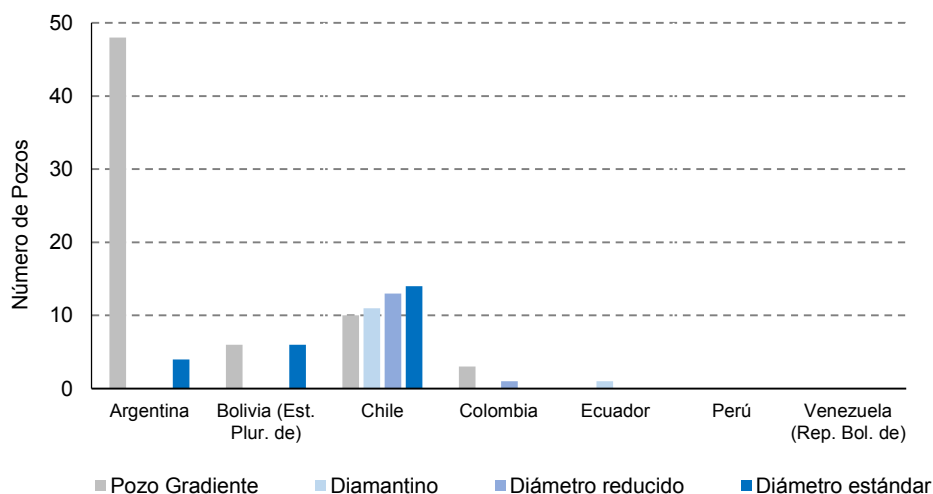
Chile, o Ecuador, Colombia y Bolivia, cuentan con la misma cantidad de proyectos en Base de Datos, pero presentan una situación muy diferente en cuanto a las actividades de perforación desarrolladas.

Gráfico 5
Distribución de pozos perforados según tipología



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 6
Distribución de pozos perforados según tipología y por país



Fuente: Elaboración propia.

El conjunto de datos arriba presentados proporciona un marco de referencia para enfocar los alcances de acciones e inversiones que son necesarias para impulsar el desarrollo del sector geotérmico en América del Sur, tanto a nivel nacional como regional. Los aspectos más relevantes se resumen en la cuadro 13 y se comentan a continuación.

Entre los 37 proyectos incluidos en la base de datos, 31 (el 84%) se encuentran en una etapa previa a la perforación exploratoria, y representan los candidatos potenciales actualmente disponibles, que pudieran beneficiarse de los programas de mitigación de riesgo de perforación exploratoria que están siendo impulsados por diferentes organismos multilaterales en la región. Los seis restantes (el 16%) son proyectos que ya han superado la etapa de perforación exploratoria, confirmando en la mayoría de los casos la existencia de un recurso comercialmente explotable, y son potenciales candidatos para financiamiento de perforaciones adicionales necesarias a completar el estudio de factibilidad o, en pocos casos, para el desarrollo comercial¹⁶⁸.

¹⁶⁸ Los únicos dos proyectos que se encuentran en una etapa de Desarrollo (Apacheta en Chile y Laguna Colorada en Bolivia) ya cuentan con financiamiento para la instalación de una primera planta geotérmica.

Cuadro 15
Estado de preparación de los proyectos

País	Pre perforación exploratoria		Post perforación exploratoria	
	Estudios geocientíficos incompletos	Listos para perforación exploratoria	En fase de factibilidad	Listos para desarrollo comercial
Argentina	4	0	1	0
Bolivia (Estado Plurinacional de)	2	0	0	1
Chile	1	6	3	1
Colombia	1,5	2	0	0
Ecuador	0,5	2	0	0
Perú	5	6	0	0
Venezuela (República Bolivariana de)	1	0	0	0
Total	15	16	4	2
Porcentaje	40,54	43,24	10,81	5,41
Porcentaje		83,78		16,22

Fuente: Elaboración propia.

Cabe sin embargo considerar que no todos los proyectos que están en etapa “pre perforación exploratoria” cuentan con un nivel de definición del recurso adecuado para la preparación de un programa de perforación exploratoria profunda consistente con los estándares de la industria geotérmica. En particular existen 9 proyectos en etapa de reconocimiento inicial (gráfico 3) y por lo menos 6 entre los que están clasificados en etapa de exploración de superficie¹⁶⁹, por un total de 15 proyectos, que necesitan estudios adicionales. Los proyectos que actualmente cuentan con las condiciones de preparación requeridas para poder solicitar apoyo de fondos de mitigación de riesgo son por lo tanto 16, en su mayoría ubicados en Chile y Perú, mientras que otros 15 necesitan inversión adicional en estudios, particularmente geofísica MT y eventuales perforaciones de diámetro reducido, para alcanzar un nivel de preparación adecuado para sustentar un programa de perforación exploratoria profunda con las características comúnmente requeridas por los entes financieros y organismos internacionales.

2. Estado de actividad y tenencia de proyectos

Otros aspectos relevantes para caracterizar el contexto del sector geotérmico son las condiciones de actividad en que se encuentran los diferentes proyectos, y su situación en cuanto a las entidades que los controlan y a los derechos que éstas poseen sobre el recurso. Estos elementos pueden tener implicaciones importantes para la canalización de inversiones hacia los proyectos, dado que la presencia de una situación legal y administrativa bien establecida en cuanto a la tenencia y administración del proyecto es un requisito fundamental para cualquier operación de financiamiento.

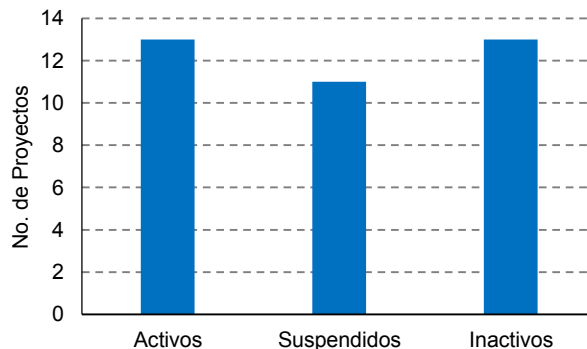
En el gráfico 7 se resumen las condiciones actuales de los proyectos en cuanto a su estado de actividad, clasificado según los criterios descritos anteriormente. Se observa que solamente el 35% de los proyectos incluidos en la Base de Datos se encuentra actualmente en actividad, es decir con labores en curso o en fase de evaluación, planificación y/o gestión de permisos para actividades

¹⁶⁹ Algunos de los proyectos que están clasificados en la Base de Datos en etapa de Exploración de Superficie, de hecho tienen cierto nivel de investigación geocientífica, pero los estudios no están completos o, por haber sido realizados en décadas pasadas, no cuentan con la aplicación de tecnologías de investigación modernas (como la MT) que son considerados hoy en día componentes fundamentales de un programa de exploración y para la modelación conceptual del recurso.

sucesivas. Los demás proyectos se encuentran suspendidos (el 30%), estando controlados por una entidad bien definida pero sin que ésta haya realizado actividades significativas durante los últimos dos años, o inactivos durante los últimos cinco años (el 35%).

Gráfico 7
Distribución de proyectos por estado de actividad

Estado actividad proyectos		
Clasificación	Cantidad	Porcentaje
Activos	13	35,14
Suspendidos	11	29,73
Inactivos	13	35,14
Total	37	100

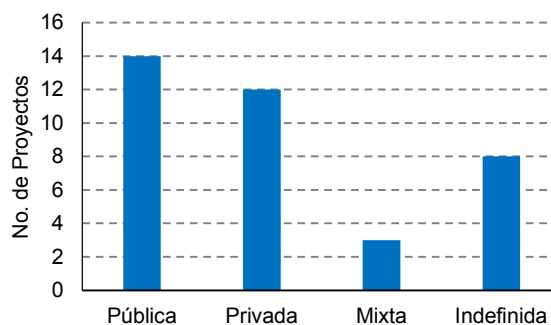


Fuente: Elaboración propia.

El gráfico 8 resume la situación en cuanto a la tenencia de los proyectos. Se observa que para una cantidad significativa de prospectos (más del 20%) no existe una entidad claramente definida que está a cargo de su exploración.

Gráfico 8
Distribución de proyectos por tenencia

Tenencia de proyectos		
Clasificación	Cantidad	Porcentaje
Pública	14	37,84
Privada	12	32,43
Mixta	3	8,11
Indefinida	8	21,62
Total	37	100



Fuente: Elaboración propia.

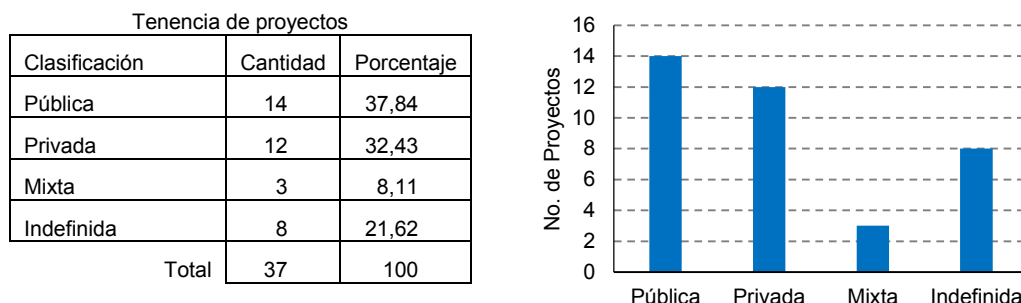
Entre los proyectos que tienen un “dueño” bien identificado, existe una repartición algo similar entre tenencia pública y privada (37% y 32%), mientras que solamente una pequeña cantidad de proyectos está controlada por entidades mixtas, público-privadas.

La situación en cuanto a la tipología de derechos de tenencia (gráfico 9) está directamente relacionada con el marco legal y regulatorio de la geotermia en cada país. En América del Sur solamente en Chile y Perú existe un marco regulatorio específico y totalmente abierto a la inversión privada para la exploración y explotación de recursos geotérmicos. En los demás países la regulación de la geotermia depende de otros instrumentos legales, como códigos mineros y de aguas, o leyes del sector eléctrico y ambientales; en algunos casos con apertura a la participación privada (Argentina y Colombia) y en otros donde la actividad es ampliamente reservada para el Estado, mediante instituciones y empresas públicas, dejando espacios muy restringidos y poco atractivos para la participación privada (Bolivia, Ecuador, República Bolivariana de Venezuela).

La situación resultante es que, entre los 37 proyectos seleccionados, los que cuentan con algún tipo de concesión o autorización formalmente establecida y que autoriza a la entidad (privada o pública) encargada del proyecto a explorar y/o explotar el recurso, son aproximadamente la mitad (51%). La

mitad restante está compuesto por un 19% de proyectos que están bajo control del Estado y por un 30% de proyectos sin concesión, es decir que están en países donde se admite la libre iniciativa para el desarrollo de energía geotérmica, pero que por varias razones no están otorgados en concesión.

Gráfico 9
Distribución de proyectos según situación concesional-administrativa



Fuente: Elaboración propia.

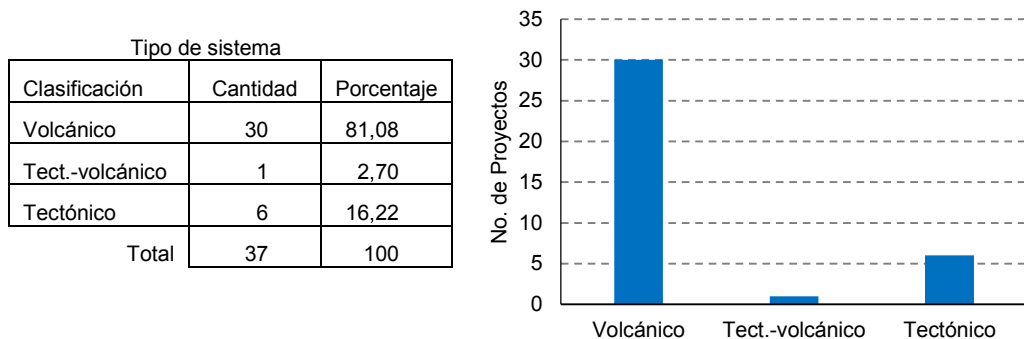
Muchos de estos casos corresponden a Perú donde la presencia de restricciones de carácter ambiental está impidiendo el otorgamiento de autorizaciones de exploración en un sector de elevado interés geotérmico.

3. Características de los recursos geotérmicos

En esta sección se resumen los principales factores que caracterizan el recurso geotérmico en los 37 proyectos incluidos en la base de datos.

En los gráficos 10 y 11 se presentan las distribuciones de los proyectos en función del tipo de sistema hidrotermal y de la edad del vulcanismo, los cuales son parámetros que proporcionan información general sobre las posibles condiciones e intensidad de la fuente de calor del sistema geotérmico.

Gráfico 10
Clasificación de proyectos en función de tipo de sistema geotérmico

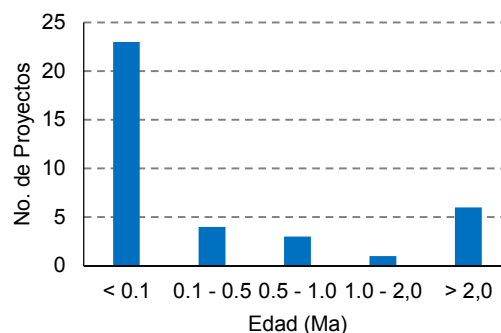


Fuente: Elaboración propia.

Los criterios de clasificación aplicados para estos parámetros están descritos en la anterior sección. Dado el alcance general de este documento, la clasificación por sistema geotérmico ha sido efectuada con referencia al criterio básico propuesto por Goff y Janick (2000). La clasificación puede ser mejorada mediante la aplicación del concepto de “geothermal play“ (IGA-IFC, 2014; Moeck et al., 2015), que a partir de un análisis más detallado del contexto geológico de cada proyecto (el cual no ha sido parte del presente trabajo), permite una definición más precisa de los controles geológicos que actúan sobre la formación del sistema hidrotermal y la acumulación del recurso explotable.

Gráfico 11
Clasificación de proyectos en función de la edad del vulcanismo

Edad del vulcanismo		
Edad (Ma)	Cantidad	Porcentaje
< 0.1	23	62,16
0.1 - 0.5	4	10,81
0.5 - 1.0	3	8,11
1.0 - 2,0	1	2,70
> 2,0	6	16,22
Total	37	100

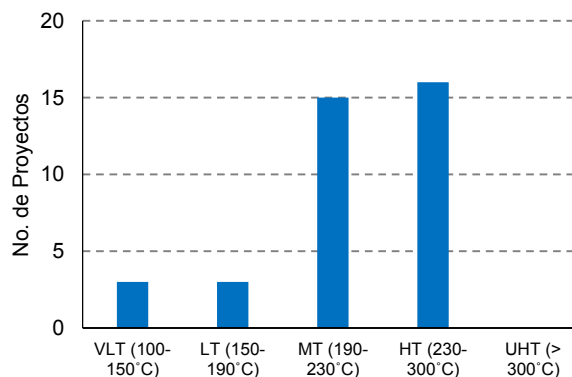


Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 12 se ilustra la distribución de los proyectos en función de la temperatura estimada o medida del recurso, aplicando la clasificación propuesta por Sanyal (2005), la cual considera las condiciones térmicas del fluido geotermal y otros factores relacionados, para determinar clases que reflejan factores relevantes para el uso práctico del recurso.

Gráfico 12
Clasificación de proyectos en función de la temperatura del recurso

Temperatura del recurso		
Clasificación	Cantidad	Porcentaje
VLT (100-150°C)	3	8,11
LT (150-190°C)	3	8,11
MT (190-230°C)	15	40,54
HT (230-300°C)	16	43,24
UHT (> 300°C)	0	0
TOTAL	37	100



Fuente: Elaboración propia.

Como esperado por las características geológicas de la región, y la asociación de la mayoría de los proyectos con la actividad magmática reciente del arco volcánico andino (mapa 13; gráfico 11), los recursos son principalmente de alta temperatura (200-300°C) y se prestan por lo tanto para generación de electricidad mediante la aplicación de tecnologías con turbinas de vapor (“*single-stage flash*”, “*double-stage flash*” o híbridas; Sanyal, 2005).

Cabe sin embargo notar que existe también cierta proporción de proyectos asociados con sistemas geotérmicos de tipo “tectónico”, controlados por circulación profunda en zonas de falla, en regiones sin vulcanismo o con vulcanismo más antiguo de 2 Ma. Estos sistemas corresponden al 16% de los proyectos y han sido identificados principalmente en Perú y Argentina, pero también en Venezuela, en posiciones retiradas detrás del arco volcánico o en zonas de discontinuidad del vulcanismo cuaternario en los Andes (ver mapa 13). Estos sistemas se asocian tendencialmente con recursos de baja temperatura (< 190°C, típicamente apropiados para generación de electricidad con tecnología binaria), pero es interesante observar que para algunos de estos sistemas en Perú los datos geotermométricos indican la posible presencia de recursos de moderada temperatura (200-220°C), mientras que el caso de El Pilar - Casanay, en la zona de fallas costeras de Venezuela, la temperatura podría ser inclusive mayor de 220°C (cuadro 10).

4. Potencial del recurso geotérmico

En cuanto al potencial del recurso geotérmico, existen varios tipos de datos que se prestan para diferentes criterios de evaluación, y que llevan a resultados con significados distintos.

La recopilación de datos disponibles a nivel regional, presentada en el capítulo I y resumida en el cuadro 1, lleva a una estimación global para los países andinos de América del Sur variable entre 6.430 y 13.320 MWe. Estos valores corresponden a la suma de los rangos de estimación de potencial geotermo-eléctrico de cada país, filtrados para excluir los datos que, según el criterio de los autores del presente documento, proporcionan visiones excesivamente especulativas del recurso recuperable. Se trata de un conjunto de estimaciones basadas en métodos distintos y con grados de confiabilidad variables, por lo cual tiene que ser considerado como un dato esencialmente indicativo, que puede representar el orden de magnitud del recurso geotermo-eléctrico potencialmente presente en la región.

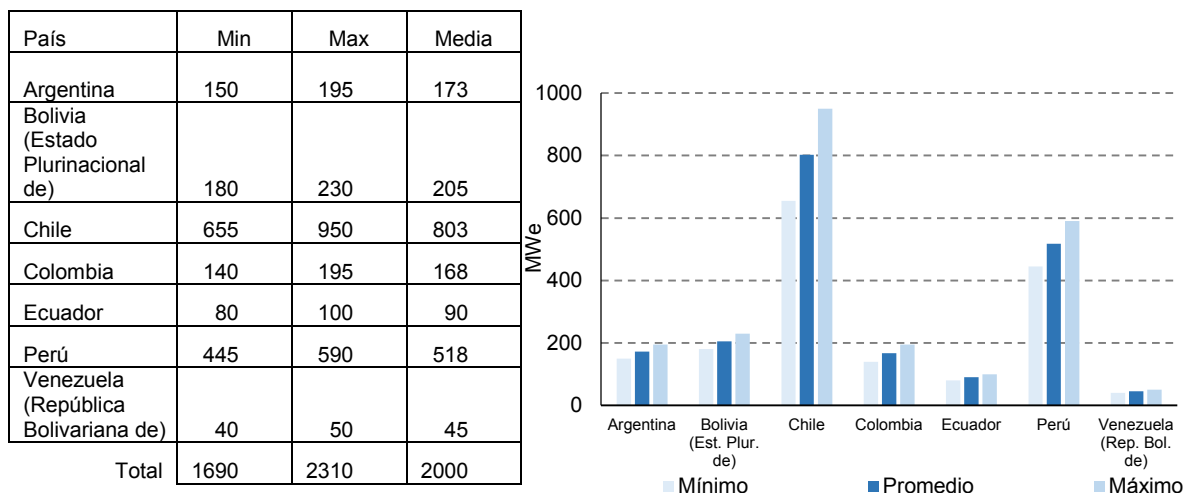
En la base de datos se recopilaron, cuando disponibles, las estimaciones de potencial de cada proyecto, según datos publicados en literatura o proporcionados por el desarrollador (“potencial reportado” en el cuadro 11). Debido al nivel poco avanzado de exploración de muchos proyectos la mayoría de los datos reportados derivan de cálculos probabilísticos basados en estimaciones del calor almacenado o de la densidad de potencia (MWe/km²). Se trata además de estimaciones cuyo significado se asocia con una probabilidad de ocurrencia, la cual no es generalmente indicada en las fuentes bibliográficas, así que los datos de potencial reportados pueden no ser directamente comparables entre sí, y generan en su conjunto una información de limitada confiabilidad. La suma de todos los valores disponibles (para 31 de los 37 proyectos, ver cuadro 11) resulta en un potencial variable entre 2.743 y 3.797 MWe. Este rango de valores, aunque basado en información no uniforme y en métodos de evaluación que generalmente proporcionan estimaciones de potencial más elevados de los que se logran generalmente confirmar con modelaciones numéricas de reservorio en etapas más avanzadas de los proyectos (Stefansson, 2005), representa una aproximación más razonable del recurso geotérmico potencialmente disponible para generación de electricidad en la región.

Los datos de potencial arriba reportados no consideran las condiciones específicas de cada proyecto, por lo tanto no pueden ser asociados con previsiones en un horizonte temporal de implementación. Por esta razón, en el presente documento se efectuó el ejercicio de estimar el desarrollo comercial que podría ser factible en el corto-mediano plazo (5-15 años), asumiendo una implementación de cada proyecto sin restricciones o limitaciones derivadas del entorno. Todo esto, basado en un análisis de la situación de cada proyecto (recurso-territorio-logística) y aplicando el juicio técnico de los autores. El resultado obtenido indica un posible desarrollo, para los 37 proyectos incluidos en la base de datos, variable entre 1.690 y 2.310 MWe, con un valor promedio de 2.000 MWe (gráfico 13).

Chile y Perú parecen ser los únicos dos países con perspectivas de poder desarrollar en el plazo considerado, siempre que existan condiciones de viabilidad comercial de los proyectos, un potencial geotérmico en el orden de los 500 MWe o superior, mientras que los demás países estarían limitados en un rango máximo de 200 MWe.

Esta estimación, que está directamente relacionada con los proyectos de calidad geotermo-eléctrica actualmente identificados en la región, se considera representativa del potencial instalable durante los próximos 5-15 años, asumiendo el escenario muy optimista en el cual todos los 37 proyectos logren pasar a una fase de desarrollo en el futuro cercano. Considerando la situación del sector geotérmico en los varios países, con sus dificultades descritas en el capítulo I el escenario considerado representa sin embargo un desafío muy ambicioso, dado que hay varios proyectos que no tienen perspectivas de poder avanzar tan rápidamente, debido a limitaciones ambientales, oposición social, o condiciones que afectan a su factibilidad económica. La evaluación de los impactos de todos estos factores sobre el potencial desarrollable requiere un análisis integrado de toda la información recolectada en la base de datos, la cual se efectúa en el sucesivo Capítulo IV.

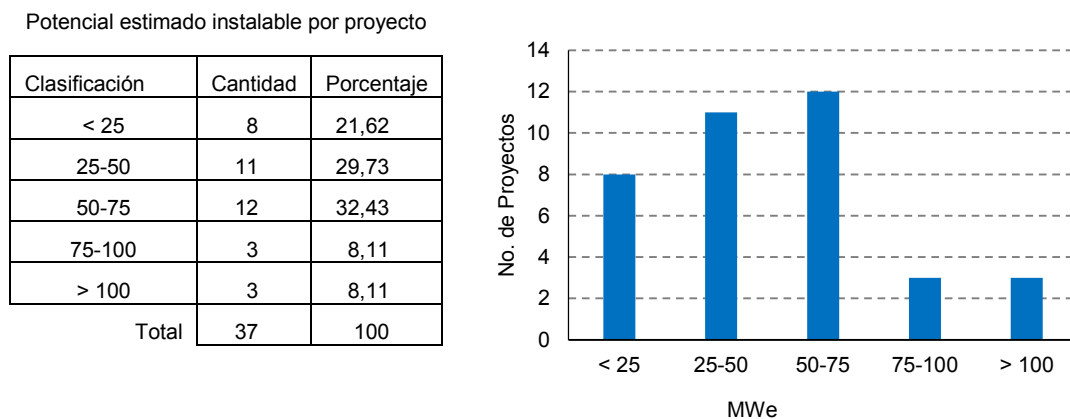
Gráfico 13
Estimación de potencial instalable por país en corto-mediano plazo



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 14 se reporta la distribución de los proyectos en función del potencial desarrollo que podría ser factible en el corto-mediano plazo, con el objetivo de evidenciar los tamaños de instalaciones geotérmicas esperables. Los valores utilizados para la clasificación corresponden al promedio del rango de “Desarrollo Probable” indicado en el cuadro 11.

Gráfico 14
Distribución de proyectos por potencial instalable estimado



Fuente: Elaboración propia.

El desarrollo de instalaciones geotérmicas de gran tamaño es muy limitado, con solamente un 8% de proyectos que podrían alcanzar en un plazo de 15 años una potencia instalada superior a 100 MWe, y en todo caso no mayor de 150 MWe (cuadro 11). La mayoría de los proyectos tendrían un desarrollo inferior a 75 MWe, con también una importante clase de pequeñas instalaciones, con capacidad en el rango 10-25 MWe. Estos desarrollos menores, representan una componente no despreciable del sector (22%), que muy probablemente va a enfrentar mayores retos de factibilidad económica debido a la ubicación remota de muchos proyectos, que se encuentran en sitios alejados de los principales puntos de conexión a la red eléctrica.

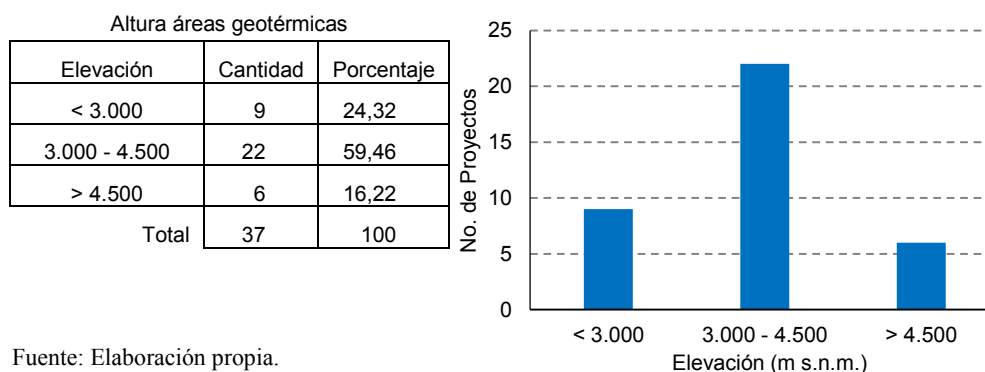
5. Condiciones físicas y logísticas de las áreas geotérmicas

En esta sección se analizan los principales aspectos asociados con las condiciones del entorno físico en el cual se ubican los proyectos geotérmicos. Se consideran las características físicas del territorio y la disponibilidad de infraestructuras, con particular referencia a los elementos que pueden complicar la ejecución de actividades de exploración o desarrollo geotérmico y tener impactos en la viabilidad técnica y económica de los proyectos.

En los gráficos 15, 16 y 17 se resume la situación de los 37 proyectos incluidos en la base de datos en cuanto a la elevación, las condiciones climáticas y la topografía de las áreas geotérmicas. Los criterios de clasificación aplicados para estos parámetros son los indicados anteriormente.

Gráfico 15

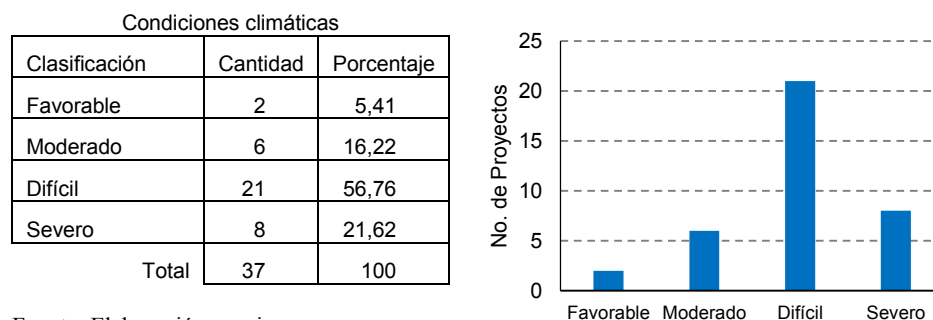
Distribución de proyectos en función de la elevación del sitio



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 16

Distribución de proyectos en función de las condiciones climáticas del sitio



Fuente: Elaboración propia.

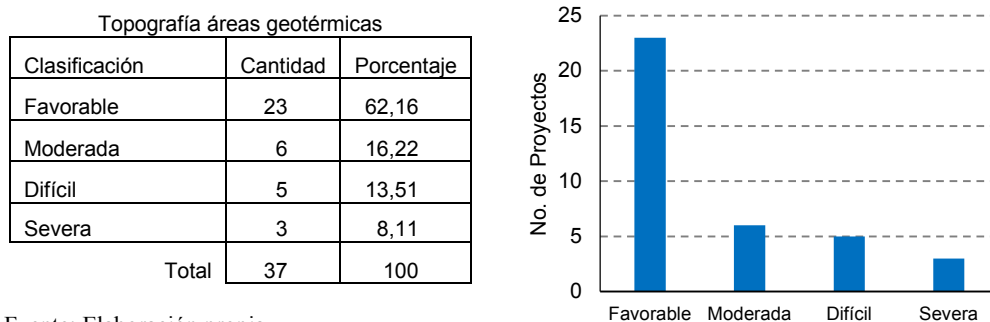
Como consecuencia de la estricta asociación de los proyectos geotérmicos con la actividad volcánica reciente de la cordillera andina, la mayoría de los casos considerados se encuentran en condiciones de altura, con un 76% de proyectos ubicados a elevaciones mayores de 3.000 m s.n.m., y un 16% por sobre los 4.500 m s.n.m. Esta situación es relevante no solamente por las dificultades de operación en condiciones de altura¹⁷⁰, sino también por los mayores requerimientos de organización y logística, selección de personal y seguridad laboral, que en su conjunto implican un incremento de costos en todas las operaciones (ver por ejemplo Pidcock, 2010; De Angelis et al., 2011).

Las condiciones cordilleranas de la mayoría de los proyectos conllevan también situaciones desfavorables desde el punto de vista climático. En el gráfico 16 se puede apreciar que casi un

¹⁷⁰ Entre los 3.500 y los 5.000 m de elevación la concentración de oxígeno en el aire se reduce entre un 25% y 50% con respecto al nivel del mar. Esto genera una amplia serie de problemas fisiológicos para el personal y una significativa reducción de potencia de los motores de combustión interna (hasta más del 40% a elevaciones superiores a los 4.000 msnm).

80% de los proyectos se encuentran en zonas con situaciones climáticas difíciles o severas, con incidencia significativa de eventos meteorológicos desfavorables para la ejecución de actividades de exploración, desarrollo y operación de un campo geotérmico. Se trata de largas temporadas con condiciones de baja temperatura, vientos fuertes, tormentas eléctricas, lluvias fuertes y nevadas. Las condiciones clasificadas como “severas” son típicas de los proyectos ubicados en el Sur de Chile y Argentina, donde la cordillera andina no es tan elevada (las áreas geotérmicas se encuentran a elevaciones inferiores a los 3.000 m s.n.m.), pero debido a la situación geográfica regional y a la latitud, el clima se caracteriza por una larga temporada de invierno con temperaturas muy bajas, vientos fuertes y abundante acumulación de nieve.

Gráfico 17
Distribución de proyectos en función de las características topográficas del área



Fuente: Elaboración propia.

La topografía de las áreas resulta por lo contrario ser un aspecto de menor preocupación, dado que más del 60 % de los proyectos se encuentran en territorios con morfología favorable para el desarrollo de instalaciones geotérmicas (gráfico 17). La presencia de situaciones topográficas difíciles o severas es sin embargo una característica de por lo menos un 20 % de los proyectos, que abarcan sectores de terreno montañoso, accidentado, con valles profundos, laderas empinadas e inestables. Los proyectos con estas características se ubican principalmente en el sur de Chile, donde el flanco occidental de la cordillera andina es abrupto y surcado por valles profundamente excavados. El problema ocurre menos frecuentemente en algunos proyectos de Perú, Ecuador y Colombia.

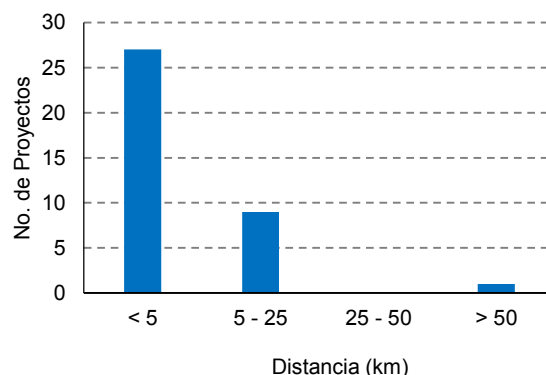
Estas situaciones dificultan la construcción de carreteras de acceso, reducen significativamente el territorio utilizable para la perforación de pozos, e imponen limitaciones importantes para el desarrollo de la infraestructura de un campo geotérmico. En estas condiciones, los impactos sobre la viabilidad de los proyectos surgen ya en fase temprana (pre-perforación exploratoria), por la necesidad de significativas inversiones en infraestructura de acceso al área y para la preparación de sitios de perforación, que son requeridas bajo condiciones de elevado riesgo, debido a la incertidumbre sobre la efectiva existencia de un recurso comercialmente explotable.

En los gráficos 18 y 19 se resumen los aspectos de carácter logístico, considerando la preexistencia de caminos de acceso hacia la zona del proyecto, determinada mediante la distancia en km entre el área geotérmica y el camino transitable con vehículos más cercano, y la distancia desde el punto de conexión a la red eléctrica, de conformidad con los criterios de clasificación indicados en la base de datos y descritos anteriormente.

La situación general de los proyectos es positiva en cuanto a la accesibilidad, dado que la mayoría de las áreas geotérmicas cuenta con un acceso vehicular preexistente o muy cercano (< 5 km - gráfico 18); mientras que la facilidad de conexión a la red eléctrica representa un tema más complejo (gráfico 19). Los datos de distancia de la red eléctrica indicados en el cuadro 11 y resumidos en el gráfico 19, son aproximados y de carácter indicativo, en su mayoría correspondientes a la distancia en línea recta entre el sitio más probable de instalación de la planta geotérmica y la subestación de conexión a la red eléctrica de alta tensión, supuesta por los autores con base en el sistema de transmisión nacional existente de cada país, o reportada en literatura. La determinación más precisa de este parámetro requiere de informaciones que no están generalmente disponibles en las etapas tempranas en las cuales se encuentran la mayoría de los proyectos considerados, por lo cual no ha sido parte del presente estudio.

Gráfico 18
Distribución de proyectos en función de la accesibilidad

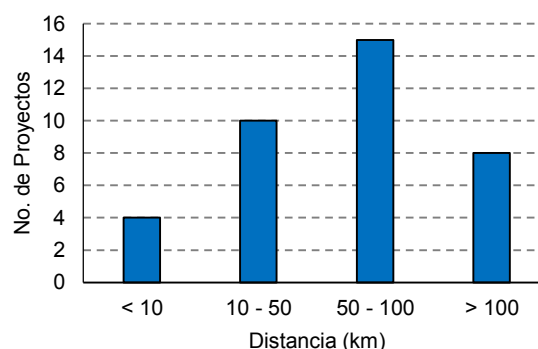
Accesibilidad áreas geotérmicas		
Distancia (km)	Cantidad	Porcentaje
< 5	27	72,97
5 - 25	9	24,32
25 - 50	0	0
> 50	1	2,70
Total	37	100



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 19
Distribución de proyectos en función de la distancia de la red eléctrica

Distancia red eléctrica		
Distancia (km)	Cantidad	Porcentaje
< 10	4	10,81
10 - 50	10	27,03
50 - 100	15	40,54
> 100	8	21,62
Total	37	100



Fuente: Elaboración propia.

Los principales factores que pueden determinar cierta variabilidad en este parámetro son: el trazado efectivo de la línea de transmisión, que puede aumentar su longitud dependiendo de situaciones topográficas o ambientales, la posibilidad de construir una subestación de interconexión específica para el proyecto en un punto más cercano de la red de transmisión, y la disponibilidad de recepción de carga de la subestación eléctrica más cercana, que puede obligar a conectarse en un sitio más alejado.

En todo caso, la evaluación de carácter preliminar que se efectuó indica que el 60% de los proyectos se encuentra a distancias mayores de 50 km desde el punto potencial de conexión a la red eléctrica, con un significativo 20 % de casos con distancia superior a los 100 km. Solamente un 10% de los proyectos está a una distancia inferior a 10 km desde la red eléctrica. Los casos más desfavorables ocurren en el altiplano y alta cordillera del sur de Perú, Bolivia y norte de Chile. Los proyectos en Bolivia, en particular, requieren de 150-200 km de línea de transmisión para conectarse a la red eléctrica nacional (cuadro 11). Todo esto es consistente con la prevaeciente ubicación de los proyectos en sectores elevados de la cordillera andina, a menudo remotos y muy poco poblados.

La distancia desde la red eléctrica es un factor que puede incidir significativamente en la viabilidad técnica, económica y financiera de los proyectos, con impactos que van más allá del incremento en requerimientos técnicos y costos, que son proporcionales a la longitud de la línea de transmisión. Al aumentar la distancia incrementan también los problemas por interferencia ampliada del proyecto con el territorio, es decir mayor necesidad de servidumbres de paso y mayor interferencia potencial con aspectos ambientales y sociales.

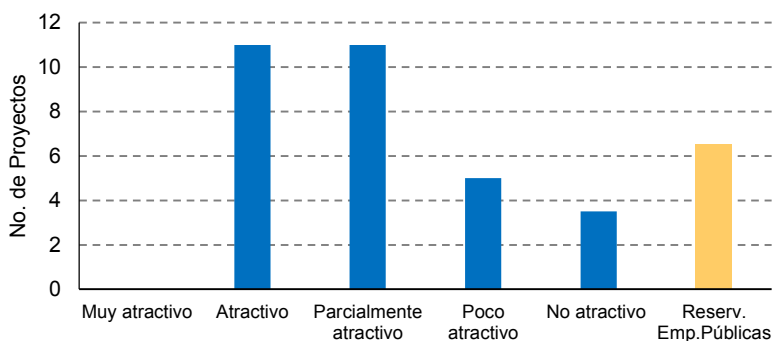
En muchos casos, todo esto hace que el componente “línea de transición” encuentre una justificación solamente si el potencial desarrollable del recurso supera cierto tamaño, lo cual implica que proyectos con perspectivas de desarrollo de mediana-pequeña talla pueden llegar a no ser atractivos solamente por su ubicación alejada de la red eléctrica. En el norte de Chile, donde la distancia de varios proyectos desde la red eléctrica del SING está alrededor de 100 km, se considera comúnmente que la construcción de una línea de transmisión de esa longitud se justifica solamente cuando el recurso desarrollable es por lo menos de 80 MWe¹⁷¹.

6. Contexto institucional y regulatorio

en la base de datos se incluyó una evaluación general de las condiciones del entorno institucional y regulatorio que corresponden a cada proyecto, en función de la normativa aplicable a la geotermia existente en cada país (cuadro 13). Los resultados de dicha evaluación se resumen en el gráfico 20.

Gráfico 20
Clasificación de proyectos según el marco institucional y regulatorio

Marco institucional & regulatorio					
Clasificación		Cantidad		Porcentaje	
Abierto Sector Privado	Muy Atractivo	0	30,5	0	82,43
	Atractivo	11		36,07	
	Parc. atractivo	11		36,07	
	Poco atractivo	5		16,39	
	No Atractivo	3,5		11,48	
Reserv. Emp.Públicas			6,5	17,57	
Total		37		100	



Fuente: Elaboración propia.

Para el contexto institucional y regulatorio se hizo una distinción entre los países en los cuales existe un marco normativo abierto a la participación del sector privado, a través de empresas privadas o PPP, y los países donde la explotación de recursos geotérmicos es reservada para el Estado, mediante empresas públicas. En el primer caso se evaluó la fortaleza del marco normativo en cuanto a su capacidad de atraer y estimular la inversión privada en el sector geotérmico, aplicando la clasificación reportada descrita anteriormente. En el segundo caso la importancia del marco normativo para incentivar el sector geotérmico es menos relevante, por lo tanto se estableció una clase única de evaluación.

En el gráfico 20 se aprecia que una importante proporción (82%) de los 37 proyectos incluidos en la base de datos cuenta con un contexto institucional y regulatorio abierto a la

¹⁷¹ Concepto difuso entre los desarrolladores geotérmicos, que deriva de evaluaciones preliminares de la factibilidad técnico-económica de los proyectos.

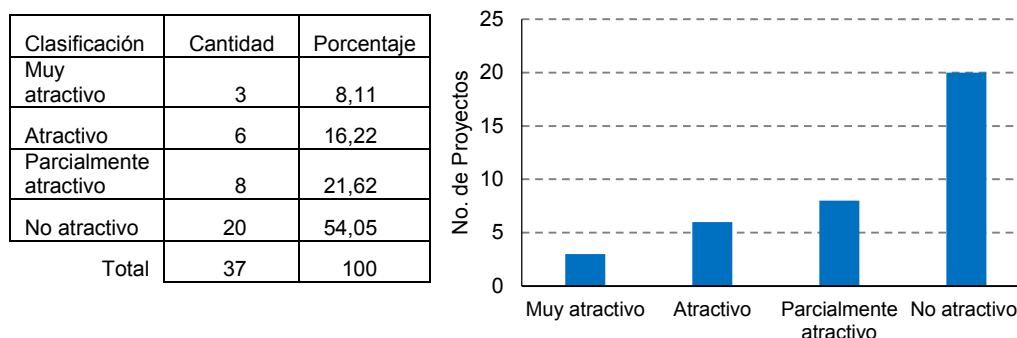
participación privada, mientras que solamente un 18% (6,5 proyectos¹⁷²) está bajo condiciones totalmente controladas por el Estado. Cabe sin embargo observar que entre los proyectos que están actualmente bajo control de entidades privadas, o que son accesibles para la inversión privada, un 28% se encuentra en contextos institucionales y regulatorios considerados poco o muy poco atractivos. Los proyectos que cuentan con una situación institucional y regulatoria abierta a la inversión privada y con un marco normativo razonablemente atractivo representan el 72 % de los casos.

7. Condiciones de mercado

Las condiciones del mercado eléctrico han sido evaluadas mediante los principales factores que pueden influenciar a la viabilidad de un proyecto geotérmico, es decir: el precio de la energía, la facilidad de obtener contratos PPA de larga duración, la presencia de eventuales restricciones de despacho para energía de carga base (que es la condición de generación más típica de la geotermia), y la disponibilidad de incentivos económicos. todos estos factores han sido clasificados en la base de datos mediante los criterios descritos anteriormente.

En cuanto al precio de la energía se utilizó como referencia el precio promedio en el mercado eléctrico del sistema interconectado correspondiente, o de mercados locales, cuando existen y son bien definidos. Se observa en el gráfico 21 que la situación en general no es muy favorable. Más de la mitad de los proyectos se enfrenta a condiciones de remuneración de la energía en el mercado normal de referencia que no son atractivas para las condiciones típicas de inversión en proyectos geotermo-eléctricos. Las situaciones muy estimulantes son limitadas a pocos casos, en Argentina, todos con posibilidad claramente identificada de venta directa de la energía a grandes consumidores locales (complejos mineros en zonas alejadas de la red eléctrica) localizados en proximidad de los sitios geotérmicos (cuadro 13).

Gráfico 21
Clasificación de proyectos según condiciones de mercado-precio de energía



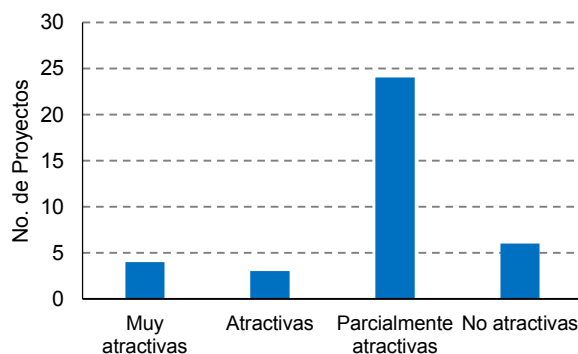
Fuente: Elaboración propia.

El gráfico 22 resume la situación en cuanto a la contratación de la energía. La financiación de proyectos geotérmicos requiere típicamente de un modelo financiero basado en un contrato de compra-venta de energía de largo plazo (PPA, comúnmente por unos 20 años, o más). La posibilidad de asegurar la venta de la energía geotérmica mediante un contrato de este tipo es por lo tanto un elemento fundamental para la viabilidad financiera de los proyectos. Obviamente las perspectivas que cada proyecto tiene de poder acceder a un contrato PPA dependen de muchos factores que requerirían un análisis detallado de cada situación, pero a nivel preliminar se estableció una referencia basada en la situación general de las contrataciones de energía en el mercado eléctrico correspondiente. Los resultados indican que la mayoría de los proyectos se encuentran en una condición definida “parcialmente atractiva”, es decir con posibilidad de acceder a contratos PPA en el mercado, pero generalmente difíciles de negociar, o aceptados con duraciones menores de 15 años.

¹⁷² El medio proyecto representa la mitad Ecuatoriana del proyecto binacional Tufiño - Chiles - Cerro Negro.

Gráfico 22
Clasificación de proyectos según condiciones de mercado.
Condiciones contratos PPA

Condiciones Contratos PPA		
Clasificación	Cantidad	Porcentaje
Muy atractivas	4	10,81
Atractivas	3	8,11
Parcialmente atractivas	24	64,86
No atractivas	6	16,22
Total	37	100



Fuente: Elaboración propia.

Las condiciones favorables, clasificadas atractivas o muy atractivas, son limitadas a un 18 % de los casos, mientras que un 16 % de los casos se encuentra en contextos donde los PPA no son disponibles, o si accesibles son negociables solamente para plazos cortos (<5 años).

En algunos países, como Argentina, Perú y Chile existen sistemas de contratación de energías renovables mediante subastas, que garantizan el precio ofertado mediante el otorgamiento de contratos PPA de largo plazo. Para la geotermia estos mecanismos hasta ahora no han generado resultados tangibles; en Argentina la única subasta del programa GENREN realizada en 2009, no recibió ofertas de proyectos geotérmicos; en Perú diferentes subastas realizadas a partir del 2009 no han incluido a la geotermia, mientras que en Chile se espera la primera subasta abierta a la geotermia en el 2016. Cabe sin embargo considerar que para poder ofertar y asumir los compromisos de entrega de energía que derivan de una subasta, los proyectos geotérmicos deben de encontrarse en una fase avanzada de definición del recurso, posiblemente con estudio de factibilidad completado, lo cual es por el momento un caso limitado a muy pocos proyectos en todo América del Sur.

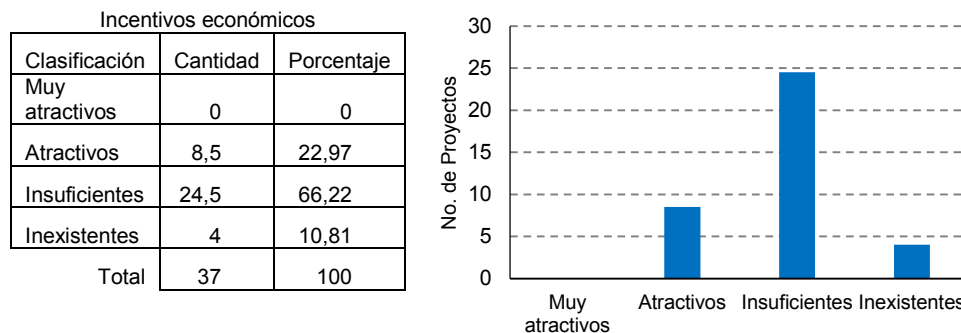
La presencia de incentivos fiscales, tarifarios o de otros tipos de beneficios económicos, es otro factor que puede contribuir a determinar condiciones favorables para el desarrollo del sector geotérmico. En las últimas décadas varios de los países considerados han establecidos programas de incentivos fiscales a favor de la investigación y desarrollo de las energías renovables (ver capítulo I), los cuales representan los principales beneficios económicos que aplican a los proyectos geotérmicos. Se trata de exenciones fiscales que abarcan varios aspectos tributarios como son: el IVA, los impuestos sobre combustibles, impuestos sobre la renta, impuestos aduaneros, impuestos locales, depreciación acelerada y otros.

En algunos países el incentivo es determinado solamente por alguna de las exenciones fiscales arriba mencionadas, mientras que en otros la aplicación es más amplia y cubre a varios de los principales aspectos tributarios. En pocos casos, como Bolivia y Venezuela los incentivos fiscales son actualmente inexistentes o inactivos. A parte de los incentivos fiscales cabe mencionar que Argentina y Ecuador han implementado políticas de tarifas reguladas (FIT) que también pueden contribuir a definir condiciones más atractivas, pero en Argentina este mecanismo no ha tenido el éxito esperado, en parte debido a las bajas tarifas, mientras que en Ecuador el mecanismo ha sido suspendido en 2014 (IRENA, 2015b).

El gráfico 23 resume la situación de los proyectos considerados en cuanto al atractivo y fortaleza de los incentivos económicos disponibles. En la mayoría de los casos (66%), que corresponden a los proyectos en Chile, Ecuador y Perú, existen ciertos incentivos pero estos, según el criterio de los autores del presente documento, no son suficientes para determinar un marco particularmente atractivo para el sector geotermo-eléctrico. La situación es un poco más favorable para un 23% de los proyectos, ubicados en Argentina y Colombia, donde los incentivos fiscales son

más amplios y pueden contribuir en determinar un contexto más atractivo. El restante 11% de los proyectos está en condiciones de inexistencia de incentivos (en Bolivia y Venezuela).

Gráfico 23
Clasificación de proyectos según condiciones de mercado.
Incentivos económico



Fuente: Elaboración propia.

En la base de datos se incluyó como factor de evaluación de las condiciones de mercado también el despacho de la energía, para considerar la eventual presencia de restricciones en la inyección de generación de carga base (como es típicamente la geotérmica) en el sistema eléctrico. En la situación actual se observa una condición uniforme en todos los países, en la cual no se registran problemas para el despacho de carga base (Cuadro 13). Por esta razón no se incluye la gráfica correspondiente a este parámetro.

Cabe sin embargo observar que la situación de algunos sistemas energéticos en la región considerada (Chile en particular) está evolucionando rápidamente, con importantes incrementos en tiempos recientes de la generación con fuentes renovables fluctuantes (solar, eólica, hidráulicas de pasada) y con ulteriores previsiones de un sustancial crecimiento en el futuro cercano. Estas situaciones podrían llegar a inducir pronto ciertas limitaciones para la entrada de nueva generación de carga base, lo cual podría tener implicaciones para el desarrollo de la generación geotérmica.

8. Contexto social y ambiental

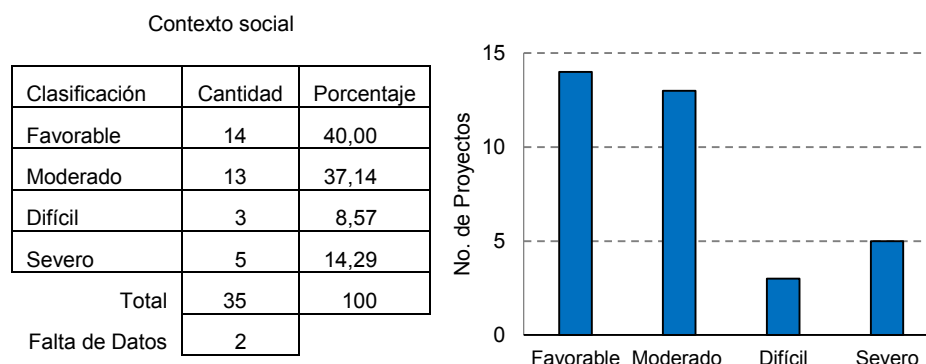
La explotación de los recursos naturales implica una interacción con el territorio, por lo cual está sujeta a interferir con aspectos de conservación ambiental y situaciones de carácter sociocultural que deben de ser oportunamente consideradas e integradas en la configuración del proyecto, para garantizar su viabilidad global. La experiencia en el sector geotérmico, y en otras industrias extractivas a nivel mundial, demuestra que estos factores pueden llegar a condicionar fuertemente las posibilidades de desarrollo de un proyecto, y en ciertos casos inclusive determinar su inviabilidad debido a fuertes oposiciones sociales y/o a la presencia de condicionamientos ambientales muy restrictivos.

La mayoría de los proyectos geotérmicos en América del Sur, por su asociación con la actividad volcánica de la alta cordillera, se localizan en zonas remotas, alejadas de grandes centros poblados, pero frecuentemente en sitios de elevado valor escénico, ecológico e hidrológico. A menudo las áreas geotérmicas se emplazan también en territorios pertenecientes a comunidades indígenas, para las cuales la tierra no es sólo un objeto de posesión y producción, sino es una entidad que representa ancestralmente la base de su propia existencia en términos físicos y espirituales.

Un interesante ejemplo de las dinámicas que pueden generarse alrededor de estos aspectos está reportado por Muñoz et al. (2014) con referencia específica a la implementación de actividades geotérmicas en el sur de Perú, pero que puede ser típico de otros contextos territoriales y sociales a lo largo de toda la cordillera andina.

Por todas estas razones, en la base de datos se incluyó una evaluación del contexto social y de las restricciones ambientales eventualmente presentes en la zona de cada proyecto. La evaluación del contexto social se hizo con referencia a la aceptabilidad del proyecto por parte de las comunidades locales, instituciones, organizaciones y la sociedad en general, y ha sido basada en informaciones disponibles en medios públicos, comunicaciones personales y en el conocimiento directo de la situación en varios proyectos por parte de los autores del presente documento. El gráfico 24 resume las condiciones generales de los proyectos incluidos en la base de datos (cuadro 13).

Gráfico 24
Clasificación de proyectos según condiciones del contexto social



Fuente: Elaboración propia.

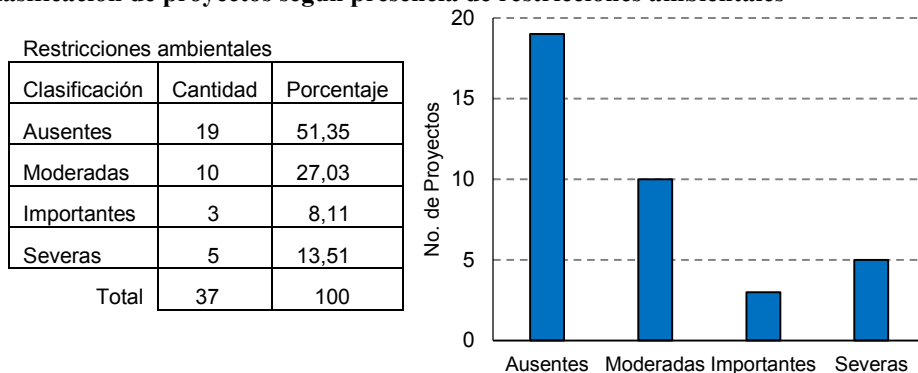
Se observa que un 77% de proyectos cuenta con una situación clasificada como favorable o moderada, es decir que tiene una buena aceptación en el entorno social, o la ocurrencia de eventuales conflictos es fácilmente manejable. Es sin embargo importante tomar en consideración que el restante 23% de proyectos enfrenta oposición social, con una significativa incidencia (14%) de situaciones severas, con oposición muy fuerte que determina condiciones de acercamiento y negociación muy difíciles. Las situaciones más complejas ocurren en territorios indígenas en el sur de Colombia y en el altiplano del sur de Perú y norte de Chile.

En cuanto a los aspectos ambientales, la evaluación se enfocó en la interferencia de los proyectos con zonas de conservación natural o áreas protegidas, cuyas regulaciones pueden implicar restricciones o inclusive prohibiciones para el desarrollo geotérmico. Los resultados se presentan en el gráfico 25, donde se observa que aproximadamente la mitad de los proyectos (51%) se encuentra en áreas sin restricciones de carácter ambiental, mientras que la otra mitad presenta interferencias con algún tipo de área protegida. Entre el 49% de los casos que presentan restricciones, una buena parte (27%) implica condiciones moderadas, manejables mediante estudios de evaluación ambiental más detallados, medidas de mitigación más costosas y gestiones más largas, por lo cual se puede afirmar que la mayor parte de los proyectos (78%) no tiene limitaciones ambientales relevantes.

El restante 22% está sujeto a restricciones importantes, que requieren procesos de autorización ambiental complejos y largos. En el caso específico de 5 proyectos (13%) casi todos en el Sur de Perú, la condición es considerada severa, dado que se encuentran totalmente al interior de un área protegida cuya normativa no contempla el desarrollo de instalaciones geotérmicas.

El restante 22% está sujeto a restricciones importantes, que requieren procesos de autorización ambiental complejos y largos. En el caso específico de 5 proyectos (13%) casi todos en el Sur de Perú, la condición es considerada severa, dado que se encuentran totalmente al interior de un área protegida cuya normativa no contempla el desarrollo de instalaciones geotérmicas.

Gráfico 25
Clasificación de proyectos según presencia de restricciones ambientales



Fuente: Elaboración propia.

B. Evaluación y clasificación de proyectos

La información contenida en la base de datos (cuadros 9 a 14) puede ser utilizada para caracterizar la situación de cada proyecto en función de los diferentes parámetros que definen el recurso geotérmico, el contexto físico en el cual se encuentra y su entorno institucional, regulatorio, de mercado y socio-ambiental.

Para tal fin se propone una metodología de clasificación basada en la atribución de puntajes a los elementos utilizados para la caracterización de los proyectos en la base de datos. De esta manera se obtiene una herramienta que permite clasificar y comparar los proyectos mediante un criterio cuantitativo, que minimiza la subjetividad en las evaluaciones.

1. Criterios de evaluación

La metodología de clasificación propuesta atribuye un peso en porcentaje y un correspondiente valor numérico máximo a los parámetros de la base de datos, para luego aplicar un puntaje igual o inferior al valor numérico máximo, en representación de las diferentes clases utilizadas para definir cada parámetro. Este método presenta la ventaja de poder variar la distribución de pesos y puntajes entre los varios parámetros, lo cual permite dirigir el análisis hacia necesidades específicas de evaluación.

En este documento se desarrolló una evaluación de base, aplicando los criterios ilustrados en el cuadro 16; sin embargo, la modalidad de evaluación puede ser variada en función de las necesidades de análisis, para atribuir más énfasis a ciertos factores, sencillamente cambiando la distribución de pesos y puntajes en la matriz de clasificación.

Como se observa en el cuadro 16, se agruparon los elementos de evaluación en dos componentes principales que incluyen respectivamente las características y ubicación del recurso y el entorno institucional, ambiental y de mercado (Entorno), a los cuales se atribuyó un igual peso, con un puntaje máximo de 40 puntos. Luego se aplicó una distribución de pesos al interior de los dos componentes, que toma en consideración la importancia de cada elemento con relación a la viabilidad técnica y económica de un proyecto. En particular se aplicaron los criterios descritos a continuación.

En el componente “Recurso” se atribuyó un 65% de peso a las características propias del recurso geotérmico y un 35% a las condiciones físicas y logísticas del sitio. Un 45% de la evaluación está distribuido en partes iguales (22,5%) entre los dos parámetros más relevantes del recurso geotérmico, es decir la temperatura y el potencial, mientras que un 15% se atribuyó al contexto

geológico-vulcanológico y un 5% a la calidad del recurso¹⁷³. En cuanto a las condiciones del sitio se aplicó una distribución uniforme de pesos (7,5%) entre todos los elementos, con excepción de la elevación, que tiene un peso ligeramente menor (5%), en consideración de que su influencia sobre la viabilidad de los proyectos no está tan marcada como aquella de los demás factores.

Cuadro 16
Crterios de clasificación de los proyectos

		COMPONENTE RECURSO				
CARACTERÍSTICAS DEL RECURSO	PARÁMETRO	ELEMENTO DE EVALUACIÓN	CLASIFICACIÓN	PUNTAJE		PESO (%)
				PUNTOS	MAX	
CARACTERÍSTICAS DEL RECURSO	TIPO DE SISTEMA	Sistemas Volcánicos Edad (Ma)	< 0.1	6	6	15,0
			0.1 - 0.5	5		
			0.5 - 1.0	4		
			1.0 - 2.0	3		
			> 2,0	2		
	Sistemas Tectónicos			2		
	TEMPERATURA DEL RECURSO	Clase de Temperatura (°C)	UHT (> 300°C)	9	9	22,5
			HT (230 - 300°C)	7		
			MT (190 - 230°C)	5		
			LT (150 - 190°C)	3		
VLT (100 - 150°C)			1			
POTENCIAL DEL RECURSO	Desarrollo Probable (MWe)	>100	9	9	22,5	
		75 - 100	7			
		50 - 75	5			
		25 - 50	3			
		< 25	1			
CALIDAD DEL RECURSO	Características Físico-Químicas Fluido Geotérmico	Alta	2	2	5,0	
		Intermedia	1			
		Baja	0			
UBICACIÓN DEL RECURSO	CONDICIONES DEL SITIO	Elevación (metros s.n.m.)	< 3.000	2	3	7,5
			3.000 - 4.500	1		
			> 4.500	0		
		Clima	Favorable	3		
			Moderado	2		
			Difícil	1		
	Topografía	Favorable	3			
		Moderada	2			
		Difícil	1			
	Accesibilidad (km)	< 5	3			
		5 - 25	2			
		25 - 50	1			
	Distancia Red Transmisión (km)	< 10	3			
		10-50	2			
		50-100	1			
				0		
TOTAL PUNTOS				40	100	100

		COMPONENTE ENTORNO				
ENTORNO INSTITUCIONAL, AMBIENTAL Y DE MERCADO	PARÁMETRO	ELEMENTO DE EVALUACIÓN	CLASIFICACIÓN	PUNTAJE		PESO (%)
				PUNTOS	MAX	
ENTORNO INSTITUCIONAL, AMBIENTAL Y DE MERCADO	CONTEXTO REGULATORIO & INSTITUCIONAL	Contexto que estimula la inversión privada, inclusive mediante PPP	Muy Atractivo	10	10	25,0
			Atractivo	7,5		
			Parcialm. Atractivo	5		
			Poco Atractivo	2,5		
			No Atractivo	0		
	Reservado Empresas Publicas			5		
	CONDICIONES DEL MERCADO ELÉCTRICO	Precio de la Electricidad	Muy Atractivo	8	8	20,0
			Atractivo	6		
			Parcialm. Atractivo	2		
		No Atractivo	0			
Condiciones Contratos PPA		Muy Atractivas	4			
		Atractivas	3			
	Parcialm. Atractivas	1				
Despacho Geo-electricidad	No Restriciones	4	4	10,0		
	Pocas Restr.	2				
	Muchas Restr.	1				
	No Factible	0				
Incentivos Económicos	Muy Atractivos	4	4	10,0		
	Atractivos	3				
	Insuficientes	1				
ASPECTOS SOCIALES Y AMBIENTALES	Contexto Social	Favorable	5	5	12,5	
		Moderado	4			
		Difícil	2			
	Severo	0				
	Restriciones Ambientales	Ausentes	5			
		Moderadas	4			
Importantes		2				
Severas			0			
TOTAL PUNTOS				40	100	100

NOTA: En caso de falta de información se aplica el valor promedio del rango de puntaje establecido para el parametro correspondiente. En tal caso el puntaje es indicado en color azul en la tabla de clasificación de proyectos. Si un proyecto presentase más de tres elementos con falta de información se excluye de la clasificación.

Fuente: Elaboración propia.

En el componente “Entorno” se atribuyó un 50% de peso a las condiciones de mercado, y el restante 50% se distribuyó uniformemente entre el contexto regulatorio e institucional y los aspectos sociales y ambientales. Esta distribución trata de reflejar la relevancia de las condiciones de mercado por su fuerte incidencia sobre la viabilidad de los proyectos, y por ser un factor que responde en gran parte a dinámicas globales y nacionales del sector energético, mientras que los aspectos institucionales, regulatorios y socio ambientales pueden ser en mayor medida controlados por los desarrolladores y por las instituciones que regulan el sector geotérmico y las condiciones ambientales a nivel nacional o local.

En las condiciones del mercado eléctrico se atribuyó un peso mayor (20%) al precio de la electricidad, con respecto al 10% de peso atribuido a los demás factores, en consideración del hecho

¹⁷³ Dado que la mayoría de los proyectos considerados, se encuentra en una etapa temprana de exploración, en la cual la calidad del recurso puede ser solamente estimada de manera preliminar con base en el contexto geológico y en las características de las manifestaciones termales en superficie, se atribuyó una representación mínima a este elemento.

que éste es comúnmente el elemento de mayor relevancia para estimular el desarrollo geotérmico y para determinar la viabilidad económica de los proyectos.

En los aspectos sociales y ambientales se distribuyó el peso uniformemente entre el contexto social y las restricciones ambientales, dado que estos dos elementos juegan un papel análogo, y muchas veces estrictamente interrelacionado, en determinar obstáculos para el desarrollo de los proyectos.

Para fines de clasificación y sucesivo análisis comparativo de los datos, se han separado los proyectos en dos grupos principales que reflejan su estado de desarrollo. En particular se estableció un grupo de proyectos que se encuentran en una etapa previa a la factibilidad (reconocimiento, exploración de superficie, perforación de prueba o perforación exploratoria en proceso) y un grupo de proyectos en fase más avanzada, con estudios de factibilidad en curso o terminados, listos para entrar a una fase de desarrollo comercial o, en algún caso, que ya están en fase de desarrollo comercial. Esta distinción, además de permitir el análisis comparativo entre proyectos que cuentan con un nivel similar de conocimiento del recurso, refleja también las necesidades de financiamiento de los proyectos, siendo los del primer grupo (etapa previa a la factibilidad) potenciales candidatos para la implementación de fondos de mitigación de riesgo geotérmico¹⁷⁴, mientras que los segundos necesitan más bien apoyo mediante fondos para perforaciones dedicadas a comprobar la capacidad del recurso o en la estructuración de una línea de financiamiento para la perforación de pozos de producción e instalación de una planta geotérmica.

La aplicación a los proyectos de la base de datos del sistema de puntajes anteriormente descrito se presenta en los Cuadros 17 al 20, que contienen los proyectos en etapa previa a la Factibilidad, y en los cuadros 21 y 22, que contienen los proyectos en fase de factibilidad o desarrollo.

¹⁷⁴ Financiamiento para las fases iniciales de mayor riesgo, como son las investigaciones de superficie y la perforación de pozos exploratorios profundos de diámetro comercial, hasta confirmar la existencia del recurso.

Cuadro 17
Clasificación de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur. Proyectos en etapa anterior a la factibilidad.
Clasificación de características y ubicación del recurso. Argentina, Estado Plurinacional de Bolivia, Chile, Colombia, Ecuador

IDENTIFICACIÓN PROYECTO			ETAPA PROYECTO	CARACTERÍSTICAS Y UBICACIÓN RECURSO																PUNTAJE SITIO		PUNTAJE TOTAL
PAIS	NOMBRE		Exploración Superficie	EDAD VULCANISMO (Ma)	CLASE TEMPERATURA	DESARROLLO PROBABLE (MWe)	CALIDAD RECURSO	PUNTAJE RECURSO	CONDICIONES SITIO						Dist. Red Transmisión	P	P	PUNTAJE TOTAL				
	Sistema Geotérmico	Sector							P	Elevación	Clima	P	Topografía	P					Accesibilidad	P		
Argentina	Domuyo	El Humazo	Exploración Superficie	0,11	5 MT	5 40-50	3 Intermedia	1 14	2.000-2.500	2 Severo	0 Moderada-Favorable	2,5	<5	3 85	1 8,5	22,5						
Argentina	Los Desoblatos	Los Desoblatos	Exploración Superficie	2,1	2 VLT-LT	2 10-15	1 Intermedia	1 6	3.900-4.000	1 Difícil-Severo	0,5 Favorable	3	<5	3 9	3 10,5	16,5						
Argentina	Tuzgle	Tuzgle	Exploración Superficie	0,01	6 VLT	1 10-15	1 Intermedia	1 9	4.200-4.700	0,5 Difícil	1 Favorable	3	<5	3 16	2 9,5	18,5						
Argentina	Toconar	Toconar	Reconocimiento	0,5	4,5 VLT	1 10-15	1 Intermedia	1 7,5	4.300-4.500	1 Difícil	1 Favorable	3	<5	3 <5	3 11	18,5						
Bolivia	Río Empexa	Towa	Exploración Superficie	<0,01	6 LT-MT	4 10-20	1 Intermedia	1 12	3.700-3.900	1 Moderado-Difícil	1,5 Favorable	3	<5	3 150	0 8,5	20,5						
Bolivia	Sajama	Río Junfuma	Reconocimiento	<0,1	6 HT	7 50-80	5 Intermedia	1 19	4.200-4.500	1 Difícil	1 Favorable	3	5-6	2 180-200	0 7	26						
Chile	Surire	Chiguana	Exploración Superficie	-4,0	3,5 HT	7 60-80	5 Alta	2 17,5	4.300-4.800	0,5 Difícil	1 Favorable	3	<5	3 115	0 7,5	25						
Chile	Pumiri	Poloque-Liencura	Perforación de Prueba	-4,0	3,5 HT	7 50-70	5 Alta	2 17,5	4.100-4.500	1 Difícil	1 Favorable	3	<5	3 100	0,5 8,5	26						
Chile	Puchuliza	Puchuliza-Tuja	Perforación de Prueba	0,9	4 MT-HT	6 30-50	3 Alta	2 15	4.200-4.400	1 Difícil	1 Favorable	3	<5	3 75	1 9	24						
Chile	Tinguirica	Tinguirica	Perforación de Prueba	<0,01	6 HT	7 50-70	5 Alta	2 20	3.200-3.500	1 Severo	0 Difícil	1	12	2 70-80	1 5	25						
Chile	Calebozo	Lloli	Perforación de Prueba	<0,01	6 HT	7 50-100	6 Alta	2 21	1.800-2.500	2 Severo	0 Difícil-Severa	0,5	50-60	0 70-80	1 3,5	24,5						
Chile	Pellado	Marposa	Perforación de Prueba	<0,01	6 HT	7 60-80	5 Alta	2 20	2.400-2.800	2 Severo	0 Favorable-Moderada	2,5	12	2 25	2 8,5	28,5						
Chile	Chilán	Chilán	Perforación de Prueba	<0,01	6 MT	5 20-30	2 Intermedia	1 14	1.700-2.500	2 Severo	0 Severo	0	<5	3 75	1 6	20						
Chile	Cordón Caulle	Cordón Caulle	Reconocimiento	<0,01	6 MT-HT	6 100-150	9 Intermedia	1 22	1.400-1.600	2 Severo	0 Moderada-Favorable	1,5	10-15	2 60	1 6,5	28,5						
Colombia	Azufral	Azufral	Exploración Superficie	<0,01	6 MT-HT	6 40-80	4 Intermedia	1 17	3.400-3.800	1 Moderado	2 Moderada	2	5-10	2 30-50	2 9	26						
Colombia	Ruiz	NWSecbr	Perforación de Prueba	<0,01	6 HT	7 60-80	5 Alta-Intermedia	1,5 19,5	3.200-4.000	1 Moderado	2 Difícil	1	20-25	2 30	2 8	27,5						
Colombia	Paipa	Paipa	Exploración Superficie	<1,9	3 LT-MT	4 20-30	2 Intermedia-Baja	0,5 9,5	2.800-2.650	2 Favorable	3 Favorable	3	<5	3 10	2,5 13,5	23						
ColEcuador	Tuifro	Chiles-Cerro Negro	Exploración Superficie	0,160	5 MT	5 40-50	3 Intermedia	1 14	3.800-4.200	1 Moderado	2 Moderada	2	<5	3 15	2 10	24						
Ecuador	Chachimburo	Chachimburo	Exploración Superficie	<0,01	6 MT-HT	6 40-50	3 Alta	2 17	3.400-3.800	1 Favorable-Moderado	2,5 Difícil	1	5-10	2 20-25	2 8,5	25,5						
Ecuador	Chacana	Cachiyacu-Jamanco	Exploración Superficie	<0,01	6 LT-MT	4 20-25	1 Intermedia	1 12	3.200-4.000	1 Favorable-Moderado	2,5 Favorable	3	5-20	2 20	2 10,5	22,5						

Cuadro 18
Clasificación de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur. Proyectos en etapa anterior a la factibilidad
Clasificación de características y ubicación del recurso. Perú y República Bolivariana de Venezuela

IDENTIFICACIÓN PROYECTO			ETAPA	CARACTERÍSTICAS Y UBICACIÓN RECURSO															PUNTAJE TOTAL			
PAÍS	NOMBRE		PROYECTO	P	CLASE TEMPERATURA	DESARROLLO PROBABLE (MWe)	P	CALIDAD RECURSO	P	PUNTAJE RECURSO	CONDICIONES SITIO						P	PUNTAJE SITIO				
	Sistema Geotérmico	Sector									Elevación	P	Clima	P	Topografía	P			Accesibilidad	P	Dist. Red Transmisión	
Perú	Puquio	Puquio	Reconocimiento	5	MT	15-20	1	Intermedia	1	9	3.900-4.200	1	Moderado	2	Favorable	3	<5	3	113	0	9	18
Perú	Pinchollo	Pinchollo	Exploración Superficie	7	HT	60-80	5	Alta	2	19	4.300-4.900	0,5	Difícil	1	Favorable-Difícil	2	<5	3	70	1	7,5	26,5
Perú	Ticsani	Calaca-Pulma	Exploración Superficie	6	MT-HT	40-60	4	Intermedia	1	17	3.800-5.000	0,5	Difícil	1	Difícil-Severa	0,5	<5	3	65	1	6	23
Perú	Tutupaca	Tutupaca	Exploración Superficie	5	MT	50-70	5	Intermedia	1	17	4.200-4.700	0,5	Difícil	1	Favorable	3	<5	3	22	2	9,5	26,5
Perú	Coollo	Tilira-Arunlaya	Reconocimiento	4	LT-MT	15-20	1	Intermedia	1	8	4.300-4.400	1	Difícil	1	Favorable	3	<5	3	117	0	8	16
Perú	Cruceiro	Cruceiro	Reconocimiento	5	MT	30-40	3	Alta	2	12	4.500-4.600	0	Difícil	1	Favorable	3	<5	3	117	0	7	19
Perú	Phaya	Phaya	Reconocimiento	4	LT-MT	15-20	1	Intermedia	1	8	4.300-4.400	1	Difícil	1	Favorable	3	<5	3	70	1	9	17
Perú	Calientes	Calientes	Exploración Superficie	5	MT	60-80	5	Alta	2	18	4.200-4.500	1	Difícil	1	Favorable-Moderada	2,5	<5	3	30	2	9,5	27,5
Perú	Ancocollo	Ancocollo	Exploración Superficie	5	MT	60-80	5	Alta	2	18	4.100-4.300	1	Difícil	1	Favorable	3	<5	3	22	2	10	28
Perú	Borateras	Borateras	Exploración Superficie	5	MT	50-60	5	Alta	2	18	4.300-4.600	0,5	Difícil	1	Favorable	3	<5	3	75	1	8,5	26,5
Perú	Casiri	Chungara-Kallepuma	Reconocimiento	5	MT	50-60	5	Alta	2	18	4.200-4.500	1	Difícil	1	Favorable	3	<5	3	75	1	9	27
Venezuela	El Pilar-Casamay	Las Miras-Mundo Nuevo	Reconocimiento	6	MT-HT	40-50	3	Intermedia-Baja	0,5	11,5	80-400	2	Favorable	3	Favorable	3	<5	3	40	2	13	24,5

Cuadro 19
Clasificación de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur. Proyectos en etapa anterior a la factibilidad.
Clasificación de entorno institucional, ambiental y de mercado. Argentina, Estado Plurinacional de Bolivia, Chile, Colombia, Ecuador

IDENTIFICACIÓN PROYECTO			ETAPA PROYECTO	CONTEXTO REGULATORIO E INSTITUCIONAL	PUNTAJE REG. E INST.	ENTORNO INSTITUCIONAL AMBIENTAL Y DE MERCADO										PUNTAJE S Y A	PUNTAJE TOTAL	
PAÍS	NOMBRE					Precio Electricidad	P	Condiciones Contratos PPA	Despacho Geoelectricidad	P	Incentivos Económicos	P	PUNTAJE MERCADO	ASPECTOS SOCIALES Y AMB.				
	Sistema Geotérmico	Sector	Contexto Social	Restricciones Ambientales	P									P				
Argentina	Domuyo	El Humazo	Exploración Superficie	Poco Atractivo	2,5	0	Muy Atractivas	4	No Restricciones	4	Atractivos	3	Moderado	4	Moderadas	4	8	21,5
Argentina	Los Desdoblados	Los Desdoblados	Exploración Superficie	Poco Atractivo	2,5	8	Parcialmente Atractivas	1	No Restricciones	4	Atractivos	3	Favorable	5	Ausentes	5	10	28,5
Argentina	Tuzgle	Tuzgle	Exploración Superficie	Poco Atractivo	2,5	8	Muy Atractivas	4	No Restricciones	4	Atractivos	3	Favorable	5	Ausentes	5	10	31,5
Argentina	Tocomar	Tocomar	Reconocimiento	Poco Atractivo	2,5	8	Muy Atractivas	4	No Restricciones	4	Atractivos	3	Favorable	5	Ausentes	5	10	31,5
Bolivia	Río Empexa	Towa	Exploración Superficie	Reservado Empresas Públicas	5	0	No Atractivas	4	No Restricciones	4	Inexistentes	0	Falta Información	2,5	Ausentes	5	7,5	16,5
Bolivia	Sajama	Río Junthuma	Reconocimiento	Reservado Empresas Públicas	5	0	No Atractivas	4	No Restricciones	4	Inexistentes	0	Falta Información	2,5	Importantes	2	4,5	13,5
Chile	Surfe	Chiguana	Exploración Superficie	Atractivo	7,5	2	Parcialmente Atractivo	2	No Restricciones	4	Insuficientes	1	Severo	0	Moderadas	4	4	19,5
Chile	Pumiri	Poloquere-Licancura	Perforación de Prueba	Atractivo	7,5	2	Parcialmente Atractivo	2	No Restricciones	4	Insuficientes	1	Moderado	4	Ausentes	5	9	24,5
Chile	Puchudiza	Puchudiza-Tuja	Perforación de Prueba	Atractivo	7,5	2	Parcialmente Atractivo	2	No Restricciones	4	Insuficientes	1	Moderado	4	Moderadas	4	8	23,5
Chile	Tinguirica	Tinguirica	Perforación de Prueba	Atractivo	7,5	7	Atractivo - Muy Atractivo	7	No Restricciones	4	Insuficientes	1	Favorable	5	Ausentes	5	10	30,5
Chile	Calabozo	Lolli	Perforación de Prueba	Atractivo	7,5	7	Atractivo - Muy Atractivo	7	No Restricciones	4	Insuficientes	1	Favorable	5	Ausentes	5	10	30,5
Chile	Pellado	Mariposa	Perforación de Prueba	Atractivo	7,5	7	Atractivo - Muy Atractivo	7	No Restricciones	4	Insuficientes	1	Favorable	5	Ausentes	5	10	30,5
Chile	Chillán	Chillán	Perforación de Prueba	Atractivo	7,5	7	Atractivo - Muy Atractivo	7	No Restricciones	4	Insuficientes	1	Difícil	2	Moderadas	4	6	26,5
Chile	Cordón Caulle	Cordón Caulle	Reconocimiento	Atractivo	7,5	7	Atractivo - Muy Atractivo	7	No Restricciones	4	Insuficientes	1	Difícil	2	Severas	0	2	22,5
Colombia	Azufal	Azufal	Exploración Superficie	No Atractivo	0	1	No Atractivo - Parcialmente	1	No Restricciones	4	Atractivos	3	Severo	0	Moderadas	4	4	15
Colombia	Ruiz	NW Sector	Perforación de Prueba	No Atractivo	0	1	No Atractivo - Parcialmente	1	No Restricciones	4	Atractivos	3	Favorable	5	Importantes	2	7	18
Colombia	Paipa	Paipa	Exploración Superficie	No Atractivo	0	1	No Atractivo - Parcialmente	1	No Restricciones	4	Atractivos	3	Moderado	4	Ausentes	5	9	20
Col/Ecuador	Tufiño	Chiles-Cerro Negro	Exploración Superficie	No Atractivo / Reservado	2,5	4	Parcialmente Atractivo	4	No Restricciones	4	Atractivos/ Insuficientes	2	Difícil-Severo	1	Moderadas	4	5	17,5
Ecuador	Chachimburo	Chachimburo	Exploración Superficie	Reservado Empresas Públicas	5	2	Parcialmente Atractivo	2	No Restricciones	4	Insuficientes	2	Moderado	4	Moderadas	4	8	21
Ecuador	Chacana	Cachiyacu-Jarameno	Exploración Superficie	Reservado Empresas Públicas	5	2	Parcialmente Atractivo	2	No Restricciones	4	Insuficientes	2	Moderado-Difícil	3	Importantes	2	5	18

Cuadro 20
Clasificación de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur. Proyectos en etapa anterior a la factibilidad.
Clasificación de entorno institucional, ambiental y de mercado. Perú y República Bolivariana de Venezuela

IDENTIFICACIÓN PROYECTO			ENTORNO INSTITUCIONAL AMBIENTAL Y DE MERCADO														PUNTAJE TOTAL		
PAÍS	NOMBRE		ETAPA PROYECTO	CONTEXTO REGULATORIO E INSTITUCIONAL	PUNTAJE REG. E INST.	CONDICIONES MERCADO				PUNTAJE MERCADO				ASPECTOS SOCIALES Y AMB.		PUNTAJE S Y A	PUNTAJE TOTAL		
	Sistema Geotérmico	Sector				Precio Electricidad	P	Condiciones Contratos PPA	Despacho Geoelectricidad	P	Incentivos Económicos	P	Contexto Social	Restricciones Ambientales	P				
Perú	Puquio	Puquio	Reconocimiento	Parcialmente Atractivo	5	No Atractivo	0	Parcialmente Atractivas	1	No Restricciones	4	Insuficientes	2	Favorable	5	Ausentes	5	10	22
Perú	Pinchollo	Pinchollo	Exploración Superficie	Parcialmente Atractivo	5	No Atractivo	0	Parcialmente Atractivas	1	No Restricciones	4	Insuficientes	2	Favorable	5	Ausentes	5	10	22
Perú	Tissani	Calacoa-Puñina	Exploración Superficie	Parcialmente Atractivo	5	No Atractivo	0	Parcialmente Atractivas	1	No Restricciones	4	Insuficientes	2	Favorable	5	Ausentes	5	10	22
Perú	Tutupaca	Tutupaca	Exploración Superficie	Parcialmente Atractivo	5	No Atractivo	0	Parcialmente Atractivas	1	No Restricciones	4	Insuficientes	2	Moderado	4	Ausentes	5	9	21
Perú	Coolo	Tiñre-Auntlaya	Reconocimiento	Parcialmente Atractivo	5	No Atractivo	0	Parcialmente Atractivas	1	No Restricciones	4	Insuficientes	2	Moderado	4	Ausentes	5	9	21
Perú	Cruceiro	Cruceiro	Reconocimiento	Parcialmente Atractivo	5	No Atractivo	0	Parcialmente Atractivas	1	No Restricciones	4	Insuficientes	2	Severo	0	Ausentes	5	5	17
Perú	Pinaya	Pinaya	Reconocimiento	Parcialmente Atractivo	5	No Atractivo	0	Parcialmente Atractivas	1	No Restricciones	4	Insuficientes	2	Moderado	4	Ausentes	5	9	21
Perú	Calentes	Calentes	Exploración Superficie	Parcialmente Atractivo	5	No Atractivo	0	Parcialmente Atractivas	1	No Restricciones	4	Insuficientes	2	Moderado	4	Severas	0	4	16
Perú	Ancocollo	Ancocollo	Exploración Superficie	Parcialmente Atractivo	5	No Atractivo	0	Parcialmente Atractivas	1	No Restricciones	4	Insuficientes	2	Moderado	4	Severas	0	4	16
Perú	Borateras	Borateras	Exploración Superficie	Parcialmente Atractivo	5	No Atractivo	0	Parcialmente Atractivas	1	No Restricciones	4	Insuficientes	2	Moderado	4	Severas	0	4	16
Perú	Casiri	Chungara-Kallapuma	Reconocimiento	Parcialmente Atractivo	5	No Atractivo	0	Parcialmente Atractivas	1	No Restricciones	4	Insuficientes	2	Moderado	4	Severas	0	4	16
Venezuela	El Pilar-Casanay	Las Minas - Mundo Nuevo	Reconocimiento	Reservado Empresas Públicas	5	No Atractivo	0	Parcialmente Atractivas	1	No Restricciones	4	Inexistentes	0	Favorable	5	Ausentes	5	10	20

Cuadro 21
Clasificación de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur. Proyectos en etapa de factibilidad o desarrollo.
Clasificación de características y ubicación del recurso

IDENTIFICACIÓN PROYECTO		CARACTERÍSTICAS Y UBICACIÓN RECURSO														ETAPA PROYECTO						
PAIS	NOMBRE		EDAD VULCANISMO (Ma)	CLASE TEMPERATURA	DESARROLLO PROBABLE (MW e)	CALIDAD RECURSO	PUNTAJE RECURSO	CONDICIONES SITIO				PUNTAJE SITIO	PUNTAJE TOTAL									
	Sistema Geotérmico	Sector						Elevación	Clima	Topografía	Accesibilidad			Dist. Red Transmisión								
Argentina	Copahue	Las Melizas	< 0,01	HT	7	80-100	7	Alta	2	22	2.000-2.100	2	Severo	0	Favorable	3	< 5	3	45	2	10	32
Bolivia	Laguna Colorada	Sol de Mañana	< 0,1	HT	7	120-150	9	Alta	2	24	4.800-5.000	0	Difícil	1	Favorable	3	< 5	3	170	0	7	31
Chile	Apacheta	Cerro Pabelón	0,13-0,05	HT	7	80-100	7	Alta	2	21,5	4.500-4800	0	Difícil	1	Favorable	3	< 5	3	73	1	8	29,5
Chile	El Tatio	El Tatio-La Torta	0,04	HT	7	120-150	9	Alta	2	24	4.300-5.000	0	Difícil	1	Favorable-Moderada	2,5	< 5	3	95	1	7,5	31,5
Chile	Tohuaca	Curacautín	< 0,01	HT	7	35-70	3	Alta	2	18	2.000-2.200	2	Severo	0	Difícil	1	10	2	68	1	6	24

Cuadro 22
Clasificación de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur. Proyectos en etapa de factibilidad o desarrollo.
Entorno institucional, ambiental y de mercado

IDENTIFICACIÓN PROYECTO		ENTORNO INSTITUCIONAL AMBIENTAL Y DE MERCADO														ETAPA PROYECTO			
PAIS	NOMBRE		CONTEXTO REGULADORIO E INSTITUCIONAL	PUNTAJE REG. E INST.	CONDICIONES MERCADO				CONDICIONES SOCIALES Y AMB.				PUNTAJE MERCADO	PUNTAJE S Y A	PUNTAJE TOTAL				
	Sistema Geotérmico	Sector			Precio Electricidad	Condiciones Contratos PPA	Despacho Geoelectricidad	Incentivos Económicos	Contexto Social	Restricciones Ambientales									
Argentina	Copahue	Las Melizas	Poco Atractivo	2,5	No Atractivo	0	Muy Atractivas	4	No Restricciones	4	Atractivos	3	13,5	Difícil	2	Moderadas	4	6	22
Bolivia	Laguna Colorada	Sol de Mañana	Reservado Empresas Públicas	5	No Atractivo	0	No Atractivas	0	No Restricciones	4	Inexistentes	0	9	Favorable	5	Moderadas	4	9	23
Chile	Apacheta	Cerro Pabelón	Atractivo	7,5	Parcialmente Atractivo	2	Parcialmente Atractivas	1	No Restricciones	4	Insuficientes	1	15,5	Favorable	5	Ausentes	5	10	33
Chile	El Tatio	El Tatio-La Torta	Atractivo	7,5	Parcialmente Atractivo	2	Parcialmente Atractivas	1	No Restricciones	4	Insuficientes	1	15,5	Severo	0	Moderadas	4	4	27
Chile	Tohuaca	Curacautín	Atractivo	7,5	Atractivo - Muy Atractivo	7	Parcialmente Atractivas	1	No Restricciones	4	Insuficientes	1	20,5	Favorable	5	Ausentes	5	10	38

2. Clasificación de proyectos

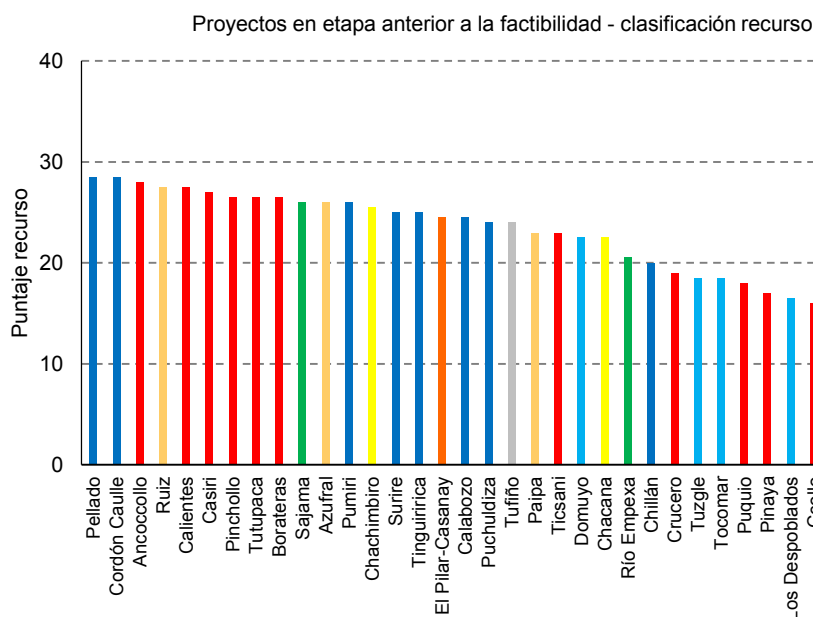
Los datos que resultan de la metodología aplicada en la sección anterior permiten clasificar los proyectos en función de diferentes parámetros y compararlos entre sí mediante elaboraciones gráficas. En los gráficos 26 y 27 se clasifica el grupo de proyectos en etapa previa a la factibilidad en función de las características de los dos componentes principales utilizados en la evaluación (recurso y entorno - cuadro 16), mientras que en el gráfico 28 se ilustran los mismos proyectos clasificados según su puntaje global, que refleja el conjunto de las condiciones del recurso y del entorno. el mismo criterio de presentación se utiliza en los gráficos 29, 30 y 31 para el grupo de proyectos en etapa de factibilidad o desarrollo. Se recuerda que el sistema de puntajes hace referencia a un valor máximo de 40 puntos para las condiciones del recurso y del entorno y a un valor máximo de 80 puntos para el global del recurso más entorno (cuadro 16).

En los diagramas 4, 5, 6 y 7 se presenta luego un nivel más avanzado de análisis de los datos, con una evaluación comparativa de los principales parámetros que definen el componente Recurso y del componente Entorno. En particular se comparan, mediante gráficos binarios, las características del recurso geotérmico con las condiciones del sitio, y el conjunto de contexto regulatorio e institucional más condiciones de mercado con los aspectos sociales y ambientales. Estas gráficas permiten apreciar la incidencia de cada parámetro en la clasificación, facilitando la identificación de las fortalezas y debilidades de cada proyecto en sus diferentes componentes.

En los diagramas 8 y 9 se presenta en fin una comparación gráfica entre el componente Recurso y el componente Entorno, para facilitar un enfoque global de las condiciones de cada proyecto y, en conjunto con las gráficas anteriores, la identificación de los principales factores que condicionan su desarrollo.

Gráfico 26
Proyectos en etapa anterior a la factibilidad.
Clasificación según el puntaje total del recurso

CLASIFICACIÓN PROYECTOS RECURSO		
PAÍS	PROYECTO	PUNTAJE (n/40)
Chile	Pellado	28,5
Chile	Cordón Caulle	28,5
Peru	Ancoccollo	28
Colombia	Ruiz	27,5
Peru	Calientes	27,5
Peru	Casiri	27
Peru	Pinchollo	26,5
Peru	Tutupaca	26,5
Peru	Borateras	26,5
Bolivia	Sajama	26
Colombia	Azufra	26
Chile	Pumiri	26
Ecuador	Chachimiro	25,5
Chile	Surire	25
Chile	Tinguiririca	25
Venezuela	El Pilar-Casanay	24,5
Chile	Calabozo	24,5
Chile	Puchuldiza	24
Col-Ecuador	Tufiño	24
Colombia	Paipa	23
Peru	Ticsani	23
Argentina	Domuyo	22,5
Ecuador	Chacana	22,5
Bolivia	Rio Empexa	20,5
Chile	Chillán	20
Peru	Crucero	19
Argentina	Tuzgle	18,5
Argentina	Tocomar	18,5
Peru	Puquio	18
Peru	Pinaya	17
Argentina	Los Despoblados	16,5
Peru	Coollo	16

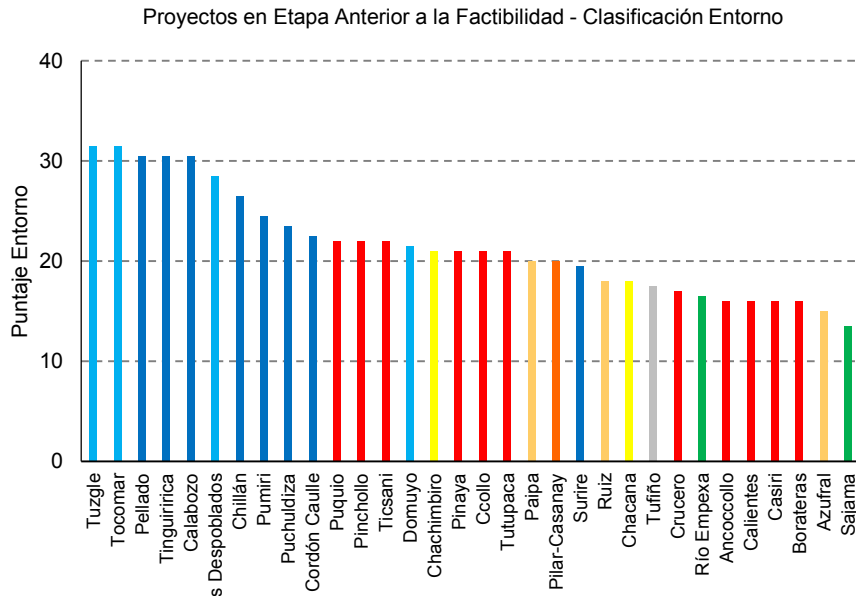


Los colores de las barras en la gráfica indican el país de cada proyecto:

- Argentina
- Bolivia (Est.Plur.de)
- Chile
- Colombia
- Ecuador
- Perú
- Binacional Colombia - Ecuador
- Venezuela (Rep.Bol. de)

Gráfico 27
Proyectos en etapa anterior a la factibilidad.
Clasificación según el puntaje total del entorno

CLASIFICACIÓN PROYECTOS ENTORNO		
PAÍS	PROYECTO	PUNTAJE (n/40)
Argentina	Tuzgle	31,5
Argentina	Tocomar	31,5
Chile	Pellado	30,5
Chile	Tinguiririca	30,5
Chile	Calabozo	30,5
Argentina	Los Despoblados	28,5
Chile	Chilán	26,5
Chile	Pumiri	24,5
Chile	Puchuldiza	23,5
Chile	Cordón Caulle	22,5
Peru	Puquio	22
Peru	Pinchollo	22
Peru	Ticsani	22
Argentina	Domuyo	21,5
Ecuador	Chachimburo	21
Peru	Pinaya	21
Peru	Coollo	21
Peru	Tutupaca	21
Colombia	Paipa	20
Venezuela	El Pilar-Casanay	20
Chile	Surire	19,5
Colombia	Ruiz	18
Ecuador	Chacana	18
Col-Ecuador	Tufiño	17,5
Peru	Crucero	17
Bolivia	Río Empexa	16,5
Peru	Ancoccollo	16
Peru	Calientes	16
Peru	Casiri	16
Peru	Borateras	16
Colombia	Azufral	15
Bolivia	Sajama	13,5

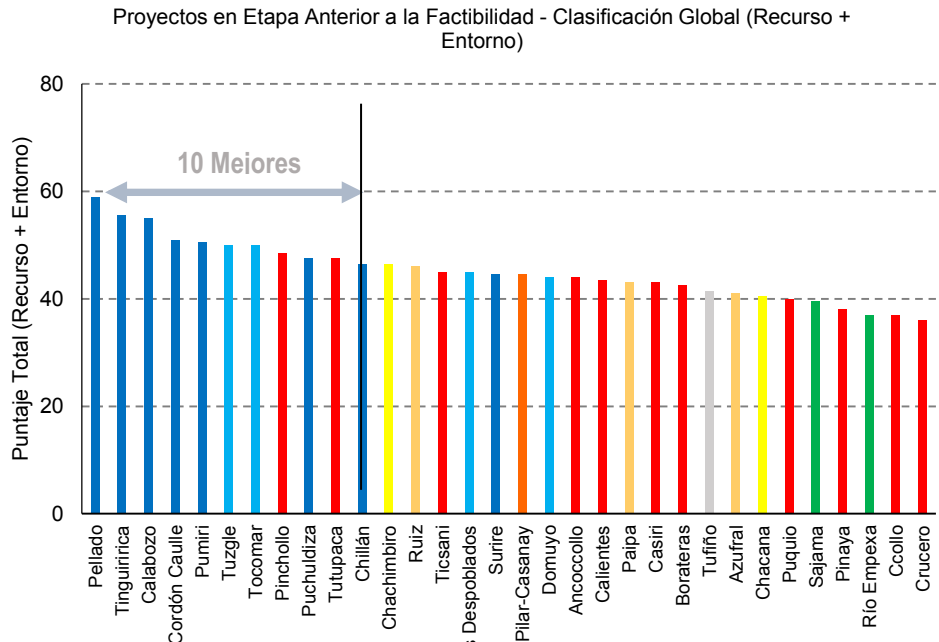


Los colores de las barras en la gráfica indican el país de cada proyecto:

- Argentina
- Bolivia (Est.Plur.de)
- Chile
- Colombia
- Ecuador
- Perú
- Binacional Colombia - Ecuador
- Venezuela (Rep.Bol. de)

Gráfico 28
Proyectos en etapa anterior a la factibilidad. Clasificación según el puntaje global del recurso y del entorno

CLASIFICACIÓN PROYECTOS GLOBAL (RECURSO + ENTORNO)		
PAÍS	PROYECTO	PUNTAJE (n/80)
Chile	Pellado	59
Chile	Tinguiririca	55,5
Chile	Calabozo	55
Chile	Cordón Caulle	51
Chile	Pumiri	50,5
Argentina	Tuzgle	50
Argentina	Tocomar	50
Peru	Pinchollo	48,5
Chile	Puchuldiza	47,5
Peru	Tutupaca	47,5
Chile	Chilán	46,5
Ecuador	Chachimburo	46,5
Colombia	Ruiz	46
Peru	Ticsani	45
Argentina	Los Despoblados	45
Chile	Surire	44,5
Venezuela	El Pilar-Casanay	44,5
Argentina	Domuyo	44
Peru	Ancoccollo	44
Peru	Calientes	43,5
Colombia	Paipa	43
Peru	Casiri	43
Peru	Borateras	42,5
Col-Ecuador	Tufiño	41,5
Colombia	Azufral	41
Ecuador	Chacana	40,5
Peru	Puquio	40
Bolivia	Sajama	39,5
Peru	Pinaya	38
Bolivia	Río Empexa	37
Peru	Coollo	37
Peru	Crucero	36



Los colores de las barras en la gráfica indican el país de cada proyecto:

- Argentina
- Bolivia (Est.Plur.de)
- Chile
- Colombia
- Ecuador
- Perú
- Binacional Colombia - Ecuador
- Venezuela (Rep.Bol. de)

Gráfico 29
Proyectos en etapa de factibilidad o desarrollo.
Clasificación según el puntaje total del recurso

Clasificación proyectos recursos		
País	Proyecto	Puntaje (n/40)
Argentina	Copahue	32
Chile	El Tatio	31,5
Bolivia (Estado Plurinacional de)	Laguna Colorada	31
Chile	Apacheta	29,5
Chile	Tolhuaca	24

Fuente: Elaboración propia.

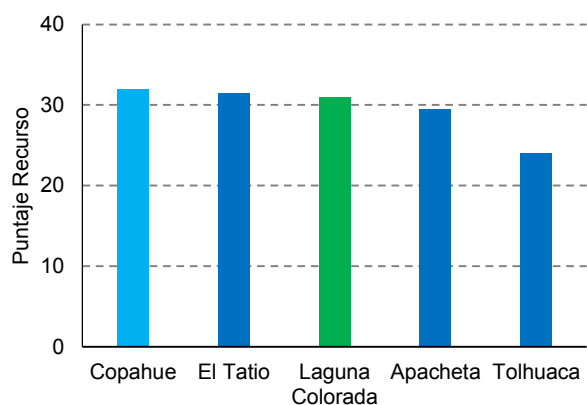


Gráfico 30
Proyectos en etapa de factibilidad o desarrollo.
Clasificación según el puntaje total del entorno

Clasificación proyectos entorno		
País	Proyecto	Puntaje (n/40)
Chile	Tolhuaca	38
Chile	Apacheta	33
Chile	El Tatio	27
Bolivia (Estado Plurinacional de)	Laguna Colorada	23
Argentina	Copahue	22

Fuente: Elaboración propia.

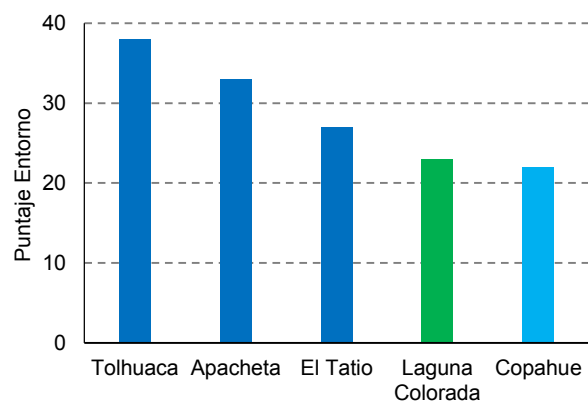


Gráfico 31
Proyectos en etapa de factibilidad o desarrollo
Clasificación según el puntaje global del recurso y del entorno

Clasificación proyectos global (recurso + entorno)		
País	Proyecto	Puntaje (n/80)
Chile	Apacheta	62,5
Chile	Tolhuaca	62
Chile	El Tatio	58,5
Bolivia (Estado Plurinacional de)	Laguna Colorada	54
Argentina	Copahue	54

Fuente: Elaboración propia.

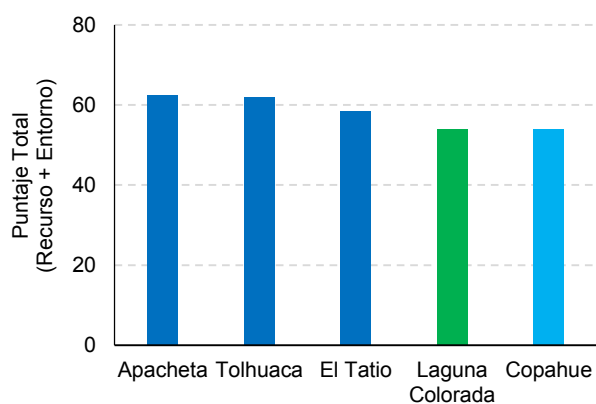


Diagrama 4
Proyectos en etapa anterior a la factibilidad. Componente recurso.
Características del recurso vs. condiciones del sitio

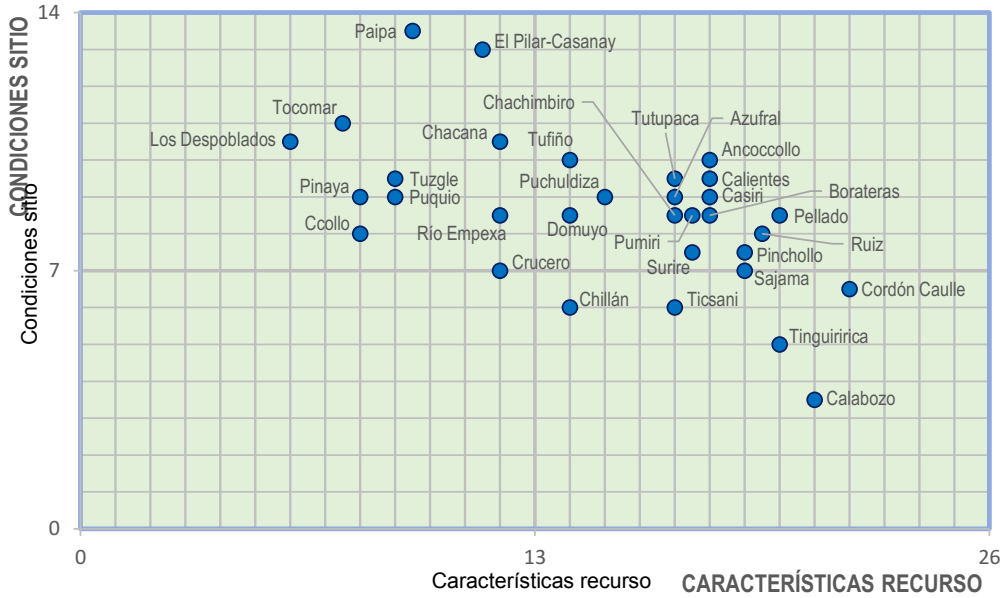


Diagrama 5
Proyectos en etapa anterior a la factibilidad. Componente entorno.
Contexto regulatorio, institucional y de mercado vs. aspectos sociales y ambientales

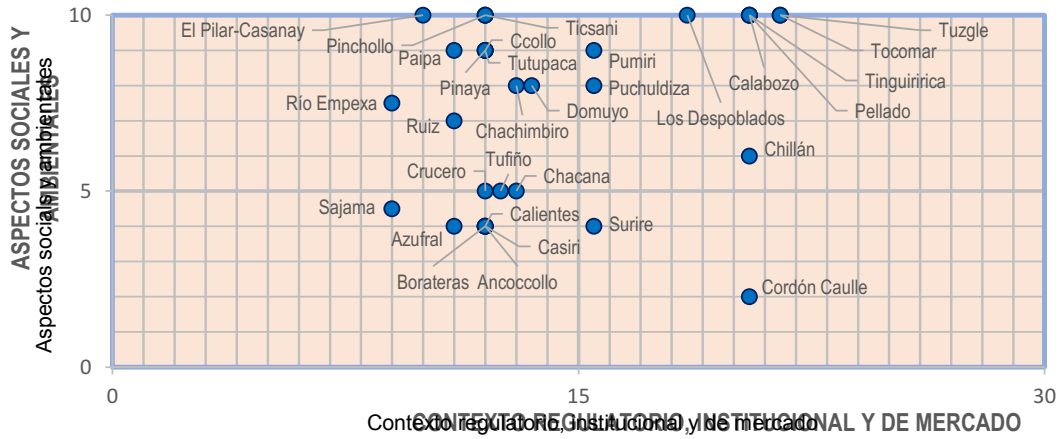


Diagrama 6
Proyectos en etapa de factibilidad o desarrollo. Componente recurso.
Características del recurso vs. condiciones del sitio

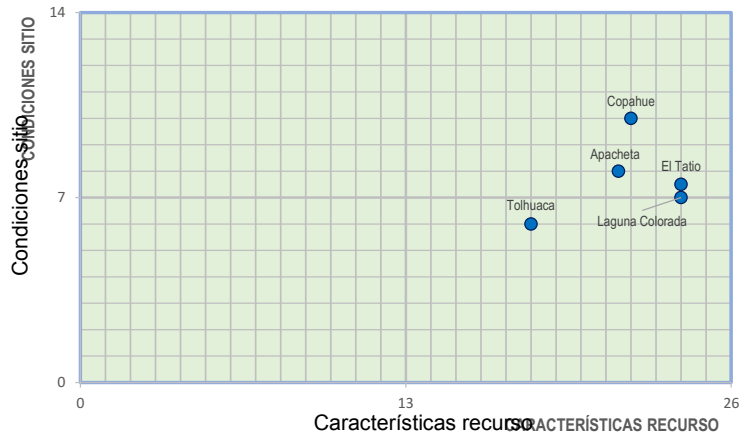


Diagrama 7
Proyectos en etapa de factibilidad o desarrollo. Componente entorno.
Contexto regulatorio, institucional y de mercado vs. aspectos sociales y ambientales

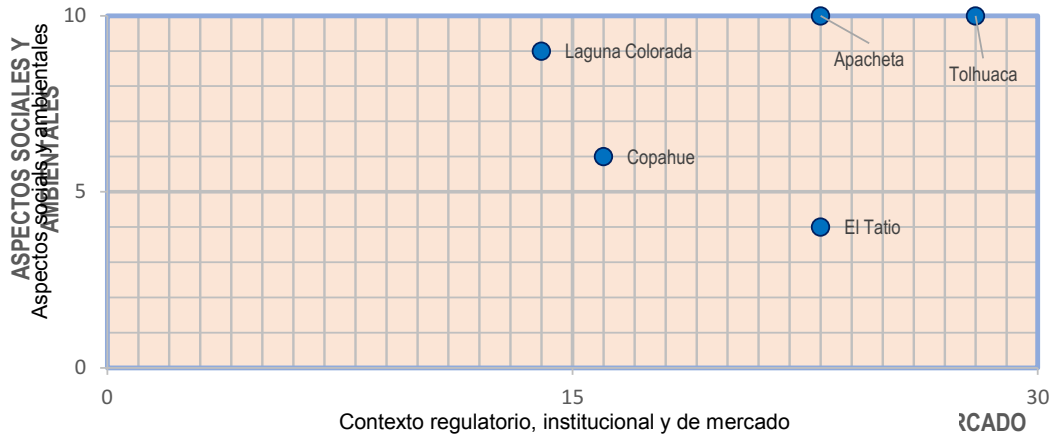


Diagrama 8
Proyectos en etapa anterior a la factibilidad. Evaluación integrada recurso vs. entorno

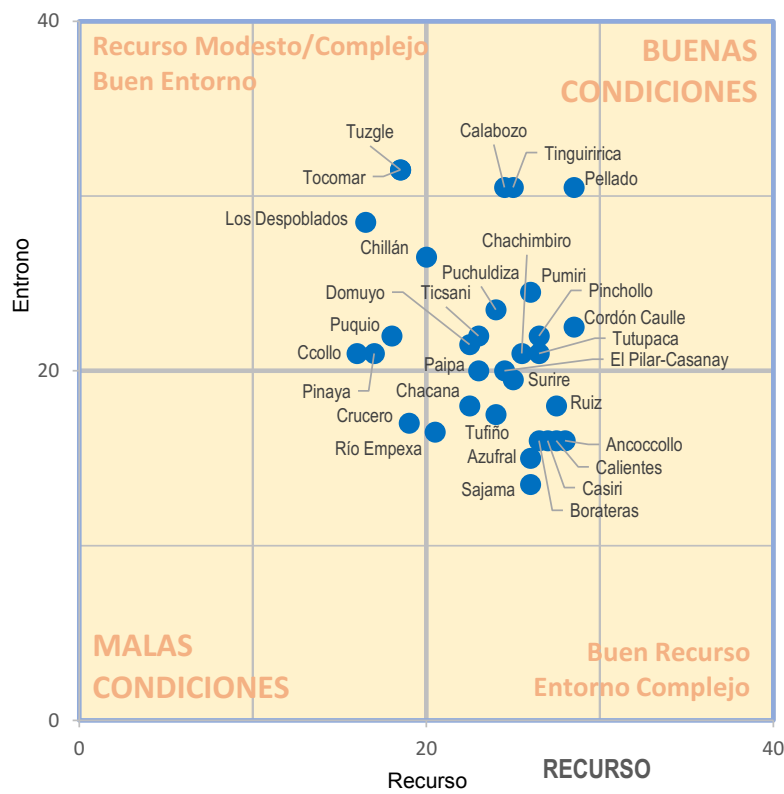
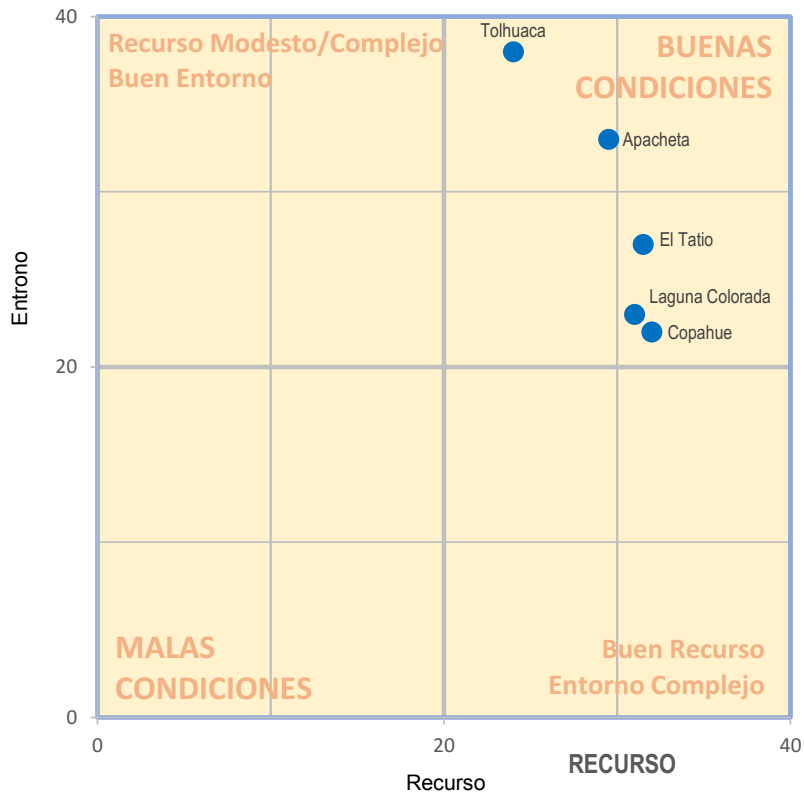


Diagrama 9
Proyectos en etapa de factibilidad o desarrollo.
Evaluación integrada recurso vs. entorno



IV. Consideraciones finales

El análisis presentado en los capítulos anteriores ha sido enfocado en la evaluación de las condiciones del sector geotermo-eléctrico en América del Sur, con particular atención en las perspectivas de desarrollo en el corto-mediano plazo, es decir aproximadamente en el horizonte temporal de los próximos 5-15 años. Por esta razón, se han seleccionado, caracterizado y clasificado los proyectos que cuentan actualmente con evidencias concretas de poder contener un recurso apto para el desarrollo geotermo-eléctrico comercial. De esta manera, se han identificado 37 proyectos que representan las opciones actualmente disponibles para concentrar los esfuerzos en exploración y desarrollo del recurso, y demostrar la viabilidad de la tecnología geotérmica en América del Sur. Varios de estos proyectos tienen un largo historial de estudios y exploraciones que remonta hasta los años '70, es decir que han sido protagonistas del escenario geotérmico de América del Sur desde hace más de 40 años.

En los países suramericanos andinos (Argentina, Bolivia, Chile, Colombia, Ecuador, Perú, Venezuela) se conocen por lo menos otras 180 áreas geotérmicas, entre las cuales posiblemente existan más proyectos de interés, pero que en este momento no tienen (o no es de conocimiento público) un nivel de investigación suficiente como para definir sus perspectivas de desarrollo geotermo-eléctrico comercial.

La mayoría de los 37 proyectos identificados se encuentra en fases iniciales de exploración, mientras que solamente seis proyectos cuentan con un efectivo conocimiento del recurso mediante perforaciones de diámetro comercial. Sólo uno de estos proyectos (Apacheta - Cerro Pabellón) está en etapa de desarrollo comercial, con actividades en curso para la instalación de una planta geotermo-eléctrica. Entre los 31 proyectos que se encuentran en fases iniciales de exploración, solamente la mitad (16) presenta condiciones de preparación suficientes como para iniciar actividades de perforación exploratoria profunda, mientras que los otros 15 proyectos necesitan investigaciones adicionales para alcanzar los estándares de modelación conceptual del recurso y programación de pozos exploratorios comúnmente aplicados en la industria geotérmica. Todo esto significa que la mayor parte de los proyectos, aún si presenta perspectivas favorables, necesita todavía de importantes esfuerzos técnicos y económicos para llegar a confirmar la existencia de un recurso explotable comercialmente. Estos esfuerzos pueden requerir un plazo de ejecución de hasta 3-5 años¹⁷⁵.

¹⁷⁵ El plazo indicado considera la ejecución de eventuales investigaciones adicionales de superficie, los procesos administrativos (permisos ambientales y sectoriales) y las gestiones financieras para la perforación exploratoria, la adquisición de derechos de uso del terreno y la preparación logística (campos de acceso, campamentos, plataformas, etc.), la contratación, movilización de equipos y ejecución de las perforaciones, las pruebas de pozo y evaluación final de resultados, hasta llegar a la confirmación de la existencia de un recurso comercialmente explotable. Todo esto, tomando en cuenta también las condiciones territoriales y ambientales de muchos proyectos, que están ubicados en zonas elevadas y remotas de la cordillera, a menudo con condiciones climáticas adversas, que limitan la ejecución de actividades de exploración y construcción de infraestructura a la ventana temporal del verano austral.

El estado de actividad de los proyectos es otro aspecto relevante del sector geotérmico en América del Sur. Una cantidad significativa de proyectos (24 de los 37 seleccionados) se encuentra con actividades suspendidas o en estado totalmente inactivo. Por otro lado, ocho de los 37 proyectos (más del 20%) no tiene un operador claramente definido, que esté a cargo de su exploración o desarrollo. Esto implica que varios de los proyectos no están listos para implementar programas de exploración o desarrollo geotérmico, sino requieren de gestiones, cuya duración puede ser muy variable en función de cada caso, para ser asignados a un operador (público o privado) con capacidad técnica y financiera apropiada, y/o para ser reactivados como proyectos en condiciones operativas.

La mayoría de los proyectos están asociados con la actividad volcánica reciente de la cordillera andina, por lo cual se encuentran en contextos geográficos que implican una amplia serie de problemáticas determinadas por ubicaciones en sectores retirados de la alta cordillera, a veces con topografía accidentada, y a menudo con condiciones climáticas adversas. Estas situaciones, en su conjunto, complican los aspectos logísticos, incrementan los tiempos de ejecución y los costos, generando impactos que pueden ser significativos para la viabilidad técnica y económica de los proyectos. El mismo contexto geográfico implica también que frecuentemente las áreas geotérmicas coincidan con sitios de elevado valor escénico, ecológico e hidrológico, y con territorios pertenecientes a comunidades indígenas, por lo cual varios proyectos se enfrentan con situaciones de oposición social (activa o potencial) y/o encuentran restricciones para su desarrollo determinadas por la presencia de áreas protegidas.

Las condiciones de entorno en cuanto al contexto institucional y regulatorio del sector geotérmico y del mercado eléctrico, obviamente varían en función del país considerados, pero en general son limitadamente o poco atractivas para inversiones en el sector geotérmico, debido a alguno o a una combinación de los siguientes factores: marcos regulatorios débiles o inapropiados, incentivos insuficientes, dificultades de contratación de energía mediante PPA de largo plazo, y precios de la energía en el mercado de referencia que no son remunerativos para las condiciones típicas de inversión en proyectos geotermo-eléctricos. Son efectivamente pocos los proyectos que cuentan con situaciones estimulantes en cuanto a estos factores.

Todos los aspectos que caracterizan el recurso geotérmico, el sitio y el entorno de cada proyecto han sido objeto de una evaluación integrada y ponderada, mediante un sistema de clasificación basado en una matriz de puntajes, que permite apreciar las fortalezas y debilidades de cada proyecto, y en fin expresar sus posibilidades de desarrollo. Este método provee una evaluación global de las condiciones de cada proyecto y es de utilidad para identificar las opciones que en el contexto recurso-entorno son más viables y presentan mejores perspectivas de ser desarrolladas exitosamente.

Existen sin embargo situaciones específicas que, independientemente de la evaluación de viabilidad global presentada pueden constituir obstáculos en el proceso de activación y desarrollo de los proyectos. Se trata de condiciones que no dependen de las actividades propias del proceso geotérmico, pero que pueden causar atrasos en su ejecución o inclusive pueden impedir el avance de un proyecto. Estas situaciones introducen factores de incertidumbre en cuanto al plazo temporal necesario para llevar un proyecto hasta su objetivo final, que es la puesta en operación de una planta geotermo-eléctrica.

En el cuadro 23 se presentan los resultados de un análisis efectuado para tomar en consideración y estimar los efectos de dichas situaciones específicas sobre los 37 proyectos considerados. Para cada uno de los proyectos, listados según la clasificación resultante del criterio de evaluación descrito, se analizan las condiciones de cuatro factores que pueden constituir barreras sustanciales para su desarrollo. Se consideran los factores siguientes:

- Operador: con referencia a la presencia de un operador claramente definido y que esté a cargo del desarrollo del proyecto. Este es un requisito fundamental; si no existe un operador con capacidad apropiada el proyecto no puede implementarse. Los procesos y

gestiones para la identificación y habilitación de un operador¹⁷⁶ pueden requerir tiempos significativos que atrasan la posibilidad de desarrollar el proyecto.

- **Accesibilidad y logística:** algunos proyectos se encuentran en sitios muy retirados y de difícil acceso en la alta cordillera andina, por lo cual necesitan inversiones significativas y de alto riesgo en infraestructura vial, antes de haber confirmado la existencia del recurso¹⁷⁷. Estas inversiones encuentran generalmente fuertes dificultades de financiamiento y son comúnmente sujetas a procesos decisionales largos y complejos.
- **Aspectos sociales:** la presencia de ciertos niveles de oposición social ha sido identificada como elemento activo o potencial en varios de los 37 proyectos geotérmicos considerados. Como en cualquier actividad de explotación de recursos naturales, se trata de un factor que requiere mucha sensibilidad y atención de parte de las instituciones competentes y de los desarrolladores, para facilitar la introducción de los proyectos en su entorno socio-cultural de manera equilibrada y sostenible. Muchos de los proyectos considerados cuentan con situaciones de aceptabilidad social favorables y se conoce también de varias experiencias en zonas geotérmicas de América del Sur que han documentado las dificultades con el entorno socio-cultural y las modalidades más adecuadas para manejarlas (ver por ejemplo: Muñoz et al., 2014; Dewhurst, 2014; Otero, 2015; Muñoz, 2015). Sin embargo, existen también algunos casos que se han caracterizado por situaciones de fuerte oposición social, con todas las perspectivas de requerir procesos largos y complicados de negociación, o inclusive de ser difícilmente solucionables, lo cual introduce mucha incertidumbre en cuanto a las posibilidades de desarrollar estos proyectos.
- **Restricciones ambientales:** la interferencia parcial o total de una zona de interés geotérmico con un área protegida implica generalmente procesos de evaluación y aprobación ambiental más detenidos y largos de lo normal, dependiendo del grado de interferencia y de los niveles de conservación establecidos. Estos procesos de aprobación ambiental conllevan en muchos casos restricciones de la superficie accesible para el proyecto y/o medidas más exigentes para la mitigación de los impactos. La industria geotérmica ha ido progresivamente desarrollando e integrando en sus procesos estándar soluciones apropiadas y tecnológicamente comprobadas para enfrentar dichas situaciones, pero siempre existe la posibilidad de que éstas puedan afectar a la viabilidad técnica y económica de los proyectos, y causar atrasos en su ejecución. Algunos de los 37 proyectos considerados interfieren con áreas protegidas de alto rango (parques nacionales) o con zonas de conservación dotadas de instrumentos normativos que no contemplan a la geotermia como actividad desarrollable en su interior, lo cual define situaciones en las cuales los proyectos están prácticamente bloqueados. En estos casos la posibilidad de desarrollarlos depende de modificaciones legales y normativas que implican

¹⁷⁶ En el caso de operadores privados, el proceso implica generalmente la selección de un desarrollador mediante licitación y el sucesivo otorgamiento de concesión por parte del Gobierno. El éxito de estas gestiones depende del interés del sector privado hacia el proyecto y del hecho que los interesados cumplan con requisitos de capacidad técnica y económica para desarrollar el proyecto. En el caso de operadores públicos, no se trata solamente de asignar el proyecto a una institución o empresa del Estado, sino también de dotar a esa entidad de capacidad técnica y administrativa apropiada para la ejecución del proyecto en todas sus etapas, hasta la operación comercial. Debido al desarrollo incipiente e discontinuo que ha tenido la geotermia en América del Sur, la mayoría de las instituciones y empresas públicas no tienen niveles de experiencia y capacidad operativa muy avanzados para la gestión de un proyecto de desarrollo geotérmico, por lo cual necesitan acciones de fortalecimiento que pueden implicar la creación de empresas mixtas (PPP), la contratación de apoyo técnico externo y/o la formación de personal.

¹⁷⁷ Aunque perforaciones preliminares de diámetro reducido pueden ser realizadas con logística helitransportada, la confirmación de la existencia de un recurso explotable comercialmente se obtiene típicamente con la perforación y prueba de pozos de diámetro comercial estándar. Estas perforaciones necesitan transporte de equipos y cargas que son factibles solamente mediante logística terrestre y, por ende, requieren la construcción de un camino de acceso para tránsito de carga pesada y voluminosa. En algunos sectores de la cordillera andina el acceso a los sitios geotérmicos requiere la construcción de decenas de km de camino, en territorio con topografía abrupta, implicando importantes obras conexas, como puentes, estabilización de laderas, protección contra avalanchas, etc. Los costos pueden alcanzar el orden de las decenas de MUS\$ y llegar a duplicar el presupuesto para un típico programa de perforación exploratoria profunda.

articulación y acuerdo entre diferentes niveles de los dominios sociales, institucionales y políticos, y por tanto son de difícil previsión.

En el cuadro 23 se reporta una evaluación de los cuatro factores arriba descritos, basada en el conocimiento actual de cada proyecto y de sus interferencias con el entorno geográfico, social y ambiental. La evaluación se expresa con banderitas verdes, cuando la situación es considerada favorable para proceder con el proyecto; anaranjadas si la situación parece algo desfavorable y puede atrasar la ejecución del proyecto; y rojas en caso de situaciones complejas que definitivamente están impidiendo el desarrollo del proyecto.

Los proyectos con banderitas todas verdes deberían estar en condiciones de poder ser desarrollados sin mayores problemas a partir de su situación actual. Los proyectos que presentan banderas anaranjadas necesitan superar algún obstáculo antes de poder ser puestos en camino para el desarrollo, mientras que los proyectos con banderitas rojas tienen definitivamente algún obstáculo sustancial que rinde la situación muy compleja, y que posiblemente requiera mucho tiempo y esfuerzos articulados con instituciones y otras entidades externas al desarrollador para ser resuelto.

Se observa que solamente 15 de los 37 proyectos (el 41%) están en condiciones para seguir con el proceso de desarrollo (banderitas todas verdes), mientras que otros 12 (el 32%) presentan algún problema que está, o puede estar, atrasando su proceso de desarrollo, y 10 proyectos (el 27%) tienen alguna condición de banderita roja. Esto significa que solamente el 73% de las opciones actualmente disponibles para el desarrollo geotérmico en América del Sur corresponde a proyectos que reúnen todas las condiciones o que posiblemente las pueden alcanzar para ser desarrollados en el mediano-corto plazo. El 27% de proyectos restantes necesita superar obstáculos significativos para poder transformarse en opciones viables, lo cual es poco probable que pueda ocurrir en el corto-mediano plazo que está siendo considerado como referencia en este documento.

Los resultados de este análisis tienen una implicación también en la estimación del potencial de desarrollo geotermo-eléctrico. Se estimó que la capacidad geotermo-eléctrica desarrollable en el corto-mediano plazo (dentro de los próximos 5-15 años), con base en los 37 proyectos identificados, estaría entre 1.690 y 2.310 MWe, asumiendo el escenario muy optimista en que todos los proyectos puedan ser activados y desarrollados sin mayores problemas. Las barreras identificadas en el cuadro 23 proporcionan ahora elementos de juicio para atribuir al potencial desarrollable de cada proyecto un nivel de probabilidad de que pueda ser efectivamente aprovechado en el corto-mediano plazo. Para tal fin se distribuyeron los datos de potencial estimado desarrollable de cada proyecto (derivados del cuadro 11) en tres clases distintas de probabilidad: probable, cuando el proyecto no presenta obstáculos evidentes (banderitas todas verdes); posible, cuando existe alguna situación que puede atrasar la ejecución del proyecto (una o dos banderitas anaranjadas); e improbable, cuando existen situaciones complejas calificadas con banderitas rojas (cuadro 23).

Este ejercicio llevó a determinar que de los 1.690-2.310 MWe potencialmente disponibles para desarrollo en el corto-mediano plazo, los que cuentan con una buena probabilidad de poder desarrollarse son 640-960 MWe, otros 440-690 MWe están bajo un escenario posible, y unos 720-860 MWe se relacionan con situaciones complejas, que hacen su desarrollo improbable.

El escenario más seguro debería ser el que corresponde a los proyectos en etapa de factibilidad o desarrollo, por ser éstos los más avanzados, con recurso confirmado, y cercanos al hito de la operación comercial. Estos proyectos representan en su conjunto un potencial desarrollable en el corto-mediano plazo de 455-570 MWe, pero menos de la mitad de este potencial (200-250 MWe) parece contar actualmente con alta probabilidad de poder ser aprovechado en el plazo considerado de 5-15 años.

Cuadro 23
Viabilidad de los proyectos y capacidad geotermo-eléctrica desarrollable

Proyectos en Etapa Anterior a la Factibilidad

	PAÍS	PROYECTO	PUNTAJE (Recurso + Entorno) n/80	IDENTIFICACIÓN DE BARRERAS				POTENCIAL DESARROLLABLE EN EL CORTO-MEDIANO PLAZO		
				Operador	Accesibilidad y Logística	Aspectos Sociales	Restricciones Ambientales	Probable	Posible	Improbable
1	Chile	Pellado	59					60-80		
2	Chile	Tinguiririca	55,5						50-70	
3	Chile	Calabozo	55							50-100
4	Chile	Cordón Caulle	51							100-150
5	Chile	Pumiri	50,5					50-70		
6	Argentina	Tuzgle	50					10-15		
7	Argentina	Tocomar	50					10-15		
8	Perú	Pinchollo	48,5					60-80		
9	Chile	Puchuldiza	47,5					30-50		
10	Perú	Tulupaca	47,5						50-70	
11	Chile	Chillán	46,5						20-30	
12	Ecuador	Chachimiro	46,5					40-50		
13	Colombia	Ruiz	46					60-80		
14	Perú	Ticsani	45					40-60		
15	Argentina	Los Despoblados	45					10-15		
16	Chile	Surire	44,5							60-80
17	Venezuela	El Pilar-Casanay	44,5						40-50	
18	Argentina	Domuyo	44						40-50	
19	Perú	Ancococollo	44							60-80
20	Perú	Calientes	43,5							60-80
21	Colombia	Paipa	43						20-30	
22	Perú	Casiri	43							50-60
23	Perú	Borladeras	42,5							50-60
24	Colombia -Ecuador	Tulíño	41,5						40-50	
25	Colombia	Azufral	41							40-60
26	Ecuador	Chacana	40,5					20-25		
27	Perú	Puquio	40					15-20		
28	Bolivia	Sajama	39,5						50-60	
29	Perú	Pinaya	38					15-20		
30	Bolivia	Río Empexa	37						10-20	
31	Perú	Ccollo	37						15-20	
32	Perú	Crucero	36							30-40
TOTAL MWe								420-580	335-450	500-710

Proyectos en Etapa de Factibilidad o Desarrollo

	PAÍS	PROYECTO	PUNTAJE (Recurso + Entorno) n/80	IDENTIFICACIÓN DE BARRERAS				POTENCIAL DESARROLLABLE EN EL CORTO-MEDIANO PLAZO		
				Operador	Accesibilidad y Logística	Aspectos Sociales	Restricciones Ambientales	Probable	Posible	Improbable
1	Chile	Apacheta	62,5					80-100		
2	Chile	Tolhuaca	62						35-70	
3	Chile	El Taño	58,5							120-150
4	Bolivia	Laguna Colorada	54					120-150		
5	Argentina	Copahue	54						80-100	
TOTAL MWe								200-250	115-170	120-150
TOTAL GENERAL MWe								640-960	440-690	720-860



Situación favorable para proceder con del proyecto.



Situación desfavorable que puede atrasar la continuación del proyecto.



Situación muy compleja que impide continuar con el proyecto.

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro 24 presenta en fin la distribución por país del potencial desarrollable en el corto-mediano plazo, discriminado según los criterios de probabilidad de ocurrencia arriba descritos.

Cuadro 24
Potencial desarrollable en el corto mediano plazo por país

País	Potencial desarrollable en el corto-mediano plazo			
	Probable	Posible	Improbable	Total
Argentina	30-45	120-150		150-195
Estado Plurinacional de Bolivia	120-150	60-80		180-230
Chile	220-300	105-170	330-480	655-950
Colombia	60-80	40-55	40-60	140-195
Ecuador	60-75	20-25		80-100
Perú	130-180	75-90	250-320	455-590
República Bolivariana de Venezuela		40-50		40-50

Fuente: Elaboración propia.

Bibliografía

- Aguilera E. (1998) - The Chalupas and Chachimbiro Geothermal Fields in Ecuador. Geothermal Resources Council Transactions Vol. 22, Sept. 20-23, 1998.
- Aguilera E., Cioni R., Gherardi F., Magro G., Marini L., Pang Z. (2005) - Chemical and Isotope Characteristics of the Chachimbiro Geothermal Fluids (Ecuador). Geothermics 34 (2005). 495-517.
- Aguilera F. (2008) - Origen y Naturaleza de los Fluidos en los Sistemas Volcánicos, Geotermiales y Termiales de Baja Entalpía en la Zona Volcánica Central (ZVC) entre los 17°43' S y 25°10' S. Universidad Católica del Norte. Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas. Tesis para Optar al Grado de Doctor en Ciencias, Mención Geología. Antofagasta, Chile, 2008.
- Alfaro C. Bernal N., Ramírez G., Escovar R. (2000) - Colombia, Country Update. Proceedings World Geothermal Congress 2000. Kyushu-Tohoku, Japan, May 28 - June 10, 2000.
- Alfaro C., Aguirre A., Jaramillo L.F. (2002) - Inventario de Fuentes Termiales Naturales en el Parque Nacional Natural de los Nevados. Documento INGEOMINAS, Bogotá, Septiembre 2002.
- Alfaro C., Velandia F., Cepeda H. (2005) - Colombian Geothermal Resources. Proceedings World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey, 24-29 April, 2005.
- Alfaro C., Velandia F., Cepeda H., Pardo N. (2010) - Preliminary Conceptual Model of the Paipa Geothermal System, Colombia. Proceedings World Geothermal Congress 2010. Bali, Indonesia, 25-29 April, 2010.
- Alfaro C. (2015) - Improvement of Perception of the Geothermal Energy as a Potential Source of Electrical Energy in Colombia, Country Update. Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia, 19-25 April, 2015.
- Alfaro C., Ortiz I., Rodríguez G., Matiz G., Malo J., Rodríguez G., Gómez L. (2015) - A Web Application Designed to Publish Information of Surface Manifestations of Hydrothermal Systems of Colombia. Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia, 19-25 April, 2015.
- Alfaro C., Ponce P., Monsalve M.L., Ortiz I., Franco J.V., Ortega A., Torres R., Gomez D. (2015) - A Preliminary Conceptual Model of Azufral Geothermal System, Colombia. Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia, 19-25 April, 2015.
- Allende F. (2015) - Removiendo Barreras e Incentivando a la Geotermia. Presentación de la Asociación Chilena de Energía Geotermia (ACHEGEO) en la "International Fair of Technology 2015". Espacio Riesco Santiago, Chile. Documento disponible en: <http://ift-energy.cl/wp-content/uploads/2015/04/1-Presentaci%C3%B3n-IFT-09-04-2015-FINAL.pdf>.

- Almeida E., Sandoval G., Panichi C., Noto P., Bellucci L. (1990) - Modelo Geotérmico Preliminar de Áreas Volcánicas del Ecuador a partir de Estudios Químicos e Isotópicos de Manifestaciones Termales. En: Geothermal Investigations with Isotope and Geochemical Techniques in Latin America. IAEA-TECDOC-641. Proceedings Final Research Coordination Meeting. San José, Costa Rica 12-16 November 1990. Documento disponible en: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/23/047/23047525.pdf.
- Barrick (2010) - Veladero Wind Turbine is one for the Record Books. Barrick Beyond borders Newsletter, April 15 2010. <http://barrickbeyondborders.com/2010/04/veladero-wind-turbine-is-one-for-the-record-books/>
- Battocletti L. and Lawrence B. (1999) - Geothermal Resources in Latin America & the Caribbean. Report prepared for Sandia National Laboratories and the US Department of Energy, Office of Geothermal Technologies. Contract No. AS-0989. February 1999.
- Beate B., Salgado R. (2005) - Geothermal Country Update for Ecuador, 2000-2005. Proceedings World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.
- _____ Salgado R. (2010) - Geothermal Country Update for Ecuador, 2005-2010. Proceedings World Geothermal Congress 2010. Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.
- Beate B., Inguaggiato S., Villares F., Benitez S., Hidalgo S. (2010) - The Cachiayacu Geothermal Prospect, Chacana Caldera, Ecuador. Proceedings World Geothermal Congress 2010. Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.
- Beate B., Urquiza M. (2015) - Geothermal Country Update for Ecuador: 2010-2015. Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
- Bernal N. (1998) - Azufral Volcano, a Geothermal Resource for Southern Colombia. Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 22, Sept. 20-23, 1998.
- Berríos C. (2015) - Caracterización Geoquímica de Sistemas Geotermiales en Zonas de Transición: Volcanes Nevados de Chillán y Copahue. Memoria para Optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología. Santiago de Chile, 2015. Documento disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/134130>.
- Bertani R. (2015) - Geothermal Power Generation in the World, 2010-2014 Update Report. Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia, 19-25 April, 2015.
- Bertrani R., Camacho A., De Stefanis L., Medina T., Zuppi G.M. (1990) - Geochemical and Isotopic Exploration of the Geothermal Area of Paipa, Cordillera Oriental, Colombia. En: Geothermal Investigations with Isotope and Geochemical Techniques in Latin America. IAEA-TECDOC-641. Proceedings Final Research Coordination Meeting. San José, Costa Rica 12-16 November 1990. Documento disponible en: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/23/047/23047525.pdf.
- Bissig, et al. (2002) - Cerro de Vidrio Rhyolitic Dome: Evidence for Late Pliocene Volcanism in the Central Andean Flat-slab Region, Lama-Veladero district, San Juan Province, Argentina. Journal of South American Earth Sciences. Vol. 15, pp. 571-56.
- BNamericas (2010) - Grupo prepara proyecto de ley geotérmica nacional. Por Christopher Lenton - Martes 15 de junio, 2010. http://www.bnamericas.com/news/energiaelectrica/Grupo_prepara_proyecto_de_ley_geotermica_nacional.
- Bolton R.S. (2004) - Wairakei Geothermal Power Plant, Its Beginnings and Other Factors. Documento disponible en: <https://www.ipenz.org.nz/heritage/Conference2004/Presentations/Bolton%20Paper.pdf>.
- Bruni S. (2014) - Geothermal Energy. A New Series on Energy Innovation. Copyright © 2014 Inter-American Development. Documento disponible en: <http://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/6601/Heat%20from%20the%20Earth%3A%20An%20Inexhaustible%20Source%20of%20Sustainable%20Energy.pdf?sequence=1>.
- _____ (2014) - Los Retos para el Desarrollo de la Geotermia. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Energía. IDB-BR-133. Documento disponible en: <http://www10.iadb.org/intal/intalcdi/PE/2014/13965.pdf>.
- Cámara de Diputados de la Nación (Argentina) (2006) - Comisión de Minería. Sesiones Ordinarias 2006. Orden del Día No 648. SUMARIO: Código de Minería de la Nación. Modificación al artículo 3°. Leyba de Martí y Pernasetti. (661-D.-2005). Dictamen de Comisión. Documento disponible en: <http://www4.hcdn.gov.ar/dependencias/comisiones/periodo-124/124-648.pdf>.

- Cardozo R.R., Hamza V.M. and Alfaro C. (2010) - Geothermal Resource Base for South America: A Continental Perspective. Proceedings World Geothermal Congress 2010. Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.
- Carrasco R. (1975) - Recursos Geotérmicos en Bolivia. Servicio Geológico de Bolivia, Proyecto de Prospección Minera en la Cordillera. La Paz, Bolivia.
- Cataldi R., Barbieri E., Merla A., (1987) - Resources and Development Perspectives of Geothermal Energy in Central and South America. Revista Brasileira de Geofísica. São Paulo, 5: 245-265.
- CELEC EP. (2014) - Estado Actual de la Geotermia en Ecuador y Colombia. ALCUE NET Geothermal Energy Workshop, Salta, December, 2014. Documento disponible en: alcuenet.eu/dms-files.php?action=doc&id=686.
- CEPAL (2000) - PROYECTO OLADE/CEPAL/GTZ. Estudio para la Evaluación del Entorno del Proyecto Geotérmico Binacional "Tufiño-Chiles-Cerro Negro". Documento interno LC/R.1995, 23 de junio de 2000. Preparado por M. Coviello.
- CEPAL, 2006 - Bolivia, Campo Geotérmico Laguna Colorada. Misión de Evaluación Técnica 16-23 de julio de 2006. Informe de Misión. Documento preparado por el consultor Paolo Bona en el contexto del "Proyecto Energías Renovables para el Desarrollo Productivo Endógeno de Países Alto-Andinos y del Caribe Sur-Oriental. Evaluación del Potencial Geotérmico y de sus Aplicaciones Productivas Endógenas en la Zona Fronteriza Trinacional Perú-Bolivia-Chile". Documento interno CEPAL, no publicado.
- CEPAL, 2014 - Argentina Geothermal Status and Perspectives. Report prepared by P. Bona for UNITED NATIONS - ECLAC Economic Commission for Latin America and the Caribbean Natural Resources and Energy Unit, January 24, 2014. Documento interno CEPAL, no publicado.
- Claros A. (2014) - Situación de la Energía Geotérmica en el Perú. Presentación en IRENA Training Workshop Santiago May 2014. Documento disponible en: http://www.irena.org/DocumentDownloads/events/2014/June/TechnicalTraining/21_Claros.pdf.
- Claros A. (2015) - Geothermal Energy in Perú. Presentación en IRENA Workshop Nairobi, Junio 2015. Documento disponible en: <http://www.irena.org/EventDocs/7.%20Peru.pdf>.
- Clavero J., Sparks S., Polanco E., Pringle M., 2004 - Evolution of Parinacota Volcano, Central Andes, Northern Chile. Revista Geológica de Chile, Vol. 31, No. 2, p. 317-347, December 2004.
- Clavero J., Pineda G., Mayorga C., Giavelli A., Aguirre I., Simmons S., Martini S., Soffia J., Arriaza R., Polanco E., Achurra L. (2011) - Geological, Geochemical, Geophysical and First Drilling Data from Tinguiririca Geothermal Area, Central Chile. GRC Transactions, Vol. 35, 2011.
- CleanEnergyIdeas, (2013) - History of Geothermal Energy. Documento disponible en: <http://www.clean-energy-ideas.com/geothermal/geothermal-energy/history-of-geothermal-energy>.
- Coira B. (1995) - Cerro Tuzgle Geothermal Prospect, Jujuy, Argentina. World Geothermal Congress Transactions, 2: 1161-1165. Florence, Italy.
- Cortéz R., Ortiz M., Vivallos J., Achurra L., Silva C., Fonseca A., Arancibia M. (2009) - Exploración Geológica para el Fomento de la Energía Geotérmica en el Área Puchuldiza Sur. XII Congreso Geológico Chileno, Santiago 22-26 Noviembre 2009. S6-019.
- Condoretti Aliaga R. (1984) - Geothermal Potential in Bolivia. Proceedings 6th New Zealand Geothermal Workshop 1984, pp 225-226.
- Cruz V. (2006) -Caracterización Geoquímica de las Fuentes Termales Alrededor del Volcán Ticsani (Moquegua). XIII Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos Sociedad Geológica del Perú.
- Cruz V., Matsuda K., (2014) - Estudio Geoquímico de las Fuentes Termales de la Zona Geotermal de Pinaya, Santa Lucía (Puno). XVII Congreso Peruano de Geología. 12-15 de octubre 2014. Lima, Perú. Documento disponible en: <http://tramite.ingemmet.gob.pe/BusquedaGeodoc/images/biblioteca/CPG17-044.pdf>.
- Cruz V., Vargas V. (2015) - Geothermal Country Update for Perú. Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
- Cumming W.B., Vieytes H., Ramírez C.F., Sussmann D. (2002)-Exploration of the La Torta Geothermal Prospect, Northern Chile. Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 26, September 22-25, 2002.

- D'Amore F., Gianelli G., Corazza E., Jauregui J., Varela P. (1990) - Geothermal Exploration by Geochemical Methods of the Thermal Area El Pilar - Mundo Nuevo, State of Sucre, Venezuela. En: Geothermal Investigations with Isotope and Geochemical Techniques in Latin America. IAEA-TECDOC-641. Proceedings Final Research Coordination Meeting. San José, Costa Rica 12-16 November 1990. Documento disponible en: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/23/047/23047525.pdf.
- D'Amore F., Gianelli G., Corazza E. (1994) - The Geothermal Area of El Pilar - Casanay, State of Sucre, Venezuela. Geochemical Exploration and Model. Geothermics, Vol. 23, No. 3, pp 283-304, 1994.
- De Angelis R., Holdeman M., Pidcock G., Levy W., Figueroa H., Lyon R. (2011) - Challenges of Drilling in the Chilean Altiplano. SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. Amsterdam, The Netherlands. March 1-3, 2011.
- Delgadillo Terceros Z. (2000) - State of Geothermal Resources in Bolivia. Laguna Colorada Project. Proceedings World Geothermal Congress 2000. Kyushu-Tohoku, Japan, May 28 - June 10, 2000.
- Dewhurst K. (2014) - Social and Political Consequences of Geothermal: A Case Study from the Nereidas Valley, Nevado del Ruiz, Colombia. Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 38, 2014.
- Dickson M.H., Fanelli M. (2003) - Geothermal Energy: Utilization and Technology. Renewable Energy Series. Published by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. ISBN 92-3-103915-6 © UNESCO 2003. Libro disponible en <http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001332/133254e.pdf>.
- Di Paola M., Luccioli F., Rico Calderón G. (1990) - Geothermal Feasibility Study of Laguna Colorada, Bolivia. Geothermal Resources Council Transactions, Vol 14, Part II, August 1990.
- Droeber, C. (1995) - Re-interpretación Volcanológica del Área de Tuzgle-Tocomar y su Implicancia en el Modelo Geotérmico. Trabajo Final de Licenciatura, Departamento de Geología FCEyN, UBA, Informe Inédito. Buenos Aires.
- Droguett B. (2012) - Alteración Hidrotermal en el Campo Geotérmico del Sistema Volcánico Tinguiririca. VI Región, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología. Santiago de Chile, 2012. Documento disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/113263>.
- EGI-University of Utah (2001) - Geothermal Energy. Clean Sustainable Energy for the benefit of the Humanity and the Environment. Documento disponible en: <http://www.geothermal.org/PDFs/GeoEnergy.pdf>.
- ENDE (2008) - Situación y Perspectivas para el Desarrollo de la Geotermia en América Latina y el Caribe. Bolivia. Seminario CEPAL-Cooperazione Italiana-Lima, Diciembre de 2008. Presentación disponible en: http://www.cepal.org/drni/noticias/noticias/0/34940/Presentaci%C3%B3n_Bolivia.pdf.
- Energy News (2013) - First Geothermal Power Plant in Argentina to be Built in the Andes. Newsletter September 13, 2013. <http://www.energynews.es/english/first-geothermal-power-plant-in-argentina-to-be-built-in-los-andes/>.
- Escobar M.A. (2014) - Proyecto Geotérmico Laguna Colorada. Documento presentado en el Congreso GEOLAC, San José, Costa Rica, Julio 2014. Documento disponible en: <https://geolac2014.pathable.com>.
- Escobar M.A. (2015) - Avance del Proyecto Geotérmico Laguna Colorada 100 MWe, Bolivia. Documento presentado en la Congreso GEOLAC, Managua, Nicaragua, 18-19 Noviembre 2015. Documento disponible en: <http://newenergyevents.com/geolac-2015-presentations/>.
- ESMAP (2012) - Geothermal Handbook: Planning and Financing Power Generation. Technical Report 002/2012. Documento disponible en: http://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/DocumentLibrary/FINAL_Geothermal%20Handbook_TR002-12_Reduced.pdf.
- Estrada L. (2013) - Geotermia. Ing. Luis Alberto Estrada, Departamento de Geodesia y Topografía, Facultad de Ciencias Exactas y Topografía, Universidad Nacional de Tucuman. Documento disponible en <http://catedras.facet.unt.edu.ar/geofisica/wp-content/uploads/sites/4/2014/02/Geotermia-2013.pdf>.
- Fidel L. (2008) - Inventario e Investigación en el Campo de la Geotermia en Perú. 1973-2008. Presentación en Seminario Semana de la Geotermia organizado por Ministerio de Energía y Minas del Perú, CEPAL y Cooperación Italiana en Lima, Perú, 5 y 5 de Diciembre de 2008. Documento Disponible en: http://www.cepal.org/drni/noticias/noticias/0/34940/lionel_fidel.pdf.

- García R.D., Gutiérrez S.L., Pareja E.R., Pusquin L.T., Dewhurst W.T., López J.P. (2014) - Case Study and First Look: Contemporary Magnetotelluric Studies Within Nereidas Valley, Nevado del Ruiz Volcano, Colombia. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 37, 2013.
- Gawell K., Reed M., Wright M. (1999) - Preliminary Report: Geothermal Energy, the Potential for Clean Power from the Earth. *Geothermal Energy Association Report*. April, 1999.
- Gherardi F., Spycher N. (2014) - Application of Integrated Multicomponent Geothermometry at the Chachimbiro Thermal Area, A Difficult Geothermal Prospection Case. *Proceedings, Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University, Stanford, California, February 24-26, 2014. SGP-TR-202.
- Giordano G., Pinton A., Cianfarra P., Baez W., Chiodi A., Viramonte J., Norini G., Gropelli G. (2013) - Structural Control on Geothermal Circulation in the Cerro Tuzgle-Tocomar Geothermal Volcanic Area (Puna Plateau, Argentina). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 249 (2013) 77-94.
- Goff F., Janick C.J. (2000) - Geothermal Systems. En: *Encyclopedia of Volcanoes* (Editor H. Sigurdsson). Pergamon Press, New York, 2000. pp.817-834.
- GQPS (2014) - Geotérmica Quellaapacheta Perú SAC. Proyecto Geotérmico Quellaapacheta. Presentación en Seminario "Energías Renovables, Eficiencia Energética y Medio Ambiente", Moquegua, 28 de Marzo 2014. Documento disponible en: http://www.dirempeq.gob.pe/web13/files/capacitacion/seminario_28_marzo_2014/3_Energia_Geotermica_Proyecto_Quellaapacheta.pdf.
- Hauser A. (1997) - Catastro y Caracterización de las Fuentes de Aguas Minerales y Termas de Chile. SERNAGEOMIN, Subdirección Nacional de Geología. *Boletín No. 50*.
- Hickson C., Ferraris F., Rodriguez C., Sielfeld G., Henriquez R., Gislason T., Selters J., Benoit D., White P., Southon J., Ussher G., Charroy J., Smith A., Lovelock B., Lawless J., Quinlivan P. Smith L., Yehia R. (2011) - The Mariposa Geothermal System, Chile. *GRC Transactions Vol. 35*, pp. 817-825, 2011.
- Hodgson S. (2013) - Focus on Chile. Part I, II, and III. *Geothermal Resources Council Bulletin*. Vol. 42, No. 1, Jan-Feb 2013; No. 2, Mar-Apr 2013; No. 3, May-June 2013.
- Huamani, A. (2001) - Aguas Termas y Minerales en el Suroriente del Perú: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, *Boletín n. 24, Serie D: Estudios Regionales*, 124 p.
- IGA-IFC (2014) - Best Practices Guide for Geothermal Exploration. Documento preparado por International Geothermal Association (IGA), en asociación con International Finance Corporation (IFC). Disponible en: http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/topics_ext_content/ifc_external_corporate_site/ifc+sustainability/learning+and+adapting/knowledge+products/publications/publications_handbook_geothermal-bp-2ed.
- INER (2015) - Plan de Líneas de Investigación para el Desarrollo de la Geotermia. Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables. Marzo de 2015. Documento disponible en: http://www.iner.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2015/07/plan_lineas_investigacion_desarrollo_geotermia.pdf.
- ISAGEN (2012) - Proyecto Geotérmico Macizo Volcánico del Ruiz. Septiembre, 2012. Documento disponible en: https://www.isagen.com.co/comunicados/PROYECTO_GEOTERMIA_Cartilla_-_Abril_de_2010.pdf.
- JICA (1981) - Report on Geothermal Power Development in Puchuldiza Area. Republic of Chile. March 1981.
- JOGMEC, Sumitomo Corporation, Mitsubishi Corporation, Nittetsu Mining Consultants CO, Ltd, (2011) - Estudio sobre Recurso Geotérmico para Suministro de Calor y Energía en la Región de Uyuni del Estado Plurinacional de Bolivia. Reporte Final. Estudio de Proyectos de Infraestructura de Iniciativa Privada en Países en Desarrollo en el Año Fiscal 2010. Report prepared for Ministry of Economy, Trade and Industry. Documento disponible en: www.meti.go.jp/meti_lib/report/2011fy/E001624.pdf.
- IRENA (2015) - Renewable Power Generation Costs in 2014. Documento disponible en: www.irena.org/publications.
- _____ (2015) - Energías Renovables en América Latina 2015: Sumario de Políticas. Junio 2015. Documento disponible en: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Latin_America_Policies_2015_ES.pdf.
- Lahsen A. y Trujillo P. (1975) - El Campo Geotérmico de El Tatio, Chile. Lawrence Berkeley Laboratory.
- Lahsen A. (1978) - Características Geoquímicas y Origen de las Aguas de las Termas de Chillán. *Universidad de Chile, Comunicaciones*, No. 24, pp.35-48.
- Lahsen A. (1978) - Origen y Potencial de Energía Geotérmica en los Andes de Chile. En: *Geología y Recursos Minerales de Chile*. Ed.: Frutos J., Oyarzun R. y Pincheira M. Universidad de Concepción, Chile (1986). I, 423-438.

- Lahsen A., Sepulveda F., Rojas J., Palacios C. (2005) - Present Status of Geothermal Exploration in Chile. Proceedings World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey, 24-29, April, 2005.
- Lahsen A., Rojas J., Morata D., Aravena D. (2015) - Exploration for High-Temperature Geothermal Resources in the Andean Countries of South America. Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
- Lloret A., Labus J. (2014) - Geothermal Development in Ecuador: History, Current Status and Future. Presented at "Short Course VI on Utilization of Low- and Medium-Enthalpy Geothermal Resources and Financial Aspects of Utilization", organized by UNU-GTP and LaGeo, in Santa Tecla, El Salvador, March 23-29, 2014. Documento disponible en: <http://www.os.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-18-08.pdf>.
- Marzolf N. (2014) - Emprendimiento de la Energía Geotérmica en Colombia. Banco Interamericano de Desarrollo. Convenio ISAGEN - BID/JC. Colombia. Documento disponible en: [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/8DF8ADF1EE6B17D105257D3900619BBA/\\$FILE/Energia_Geotermica_Colombia.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/8DF8ADF1EE6B17D105257D3900619BBA/$FILE/Energia_Geotermica_Colombia.pdf).
- Masías P., Antayhua Y., Ramos D. (2010) - Monitoreo Geoquímico de las Fumarolas y Fuentes Termales Alrededor del Volcán Ticsani 2005-2009 (Moquegua). XV Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos. Sociedad Geológica del Perú, Pub. Esp. N° 9 (2010), Cusco p. 1132-1135.
- Maureira G. (2013) - Alteración Hidrotermal y Geoquímica de las Aguas Termales en el Área de la Concesión Geotérmica Licancura III, I Región de Tarapacá, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología. Santiago de Chile, Junio 2013. Documento disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/114782>.
- Mejía E., Rayo L., Méndez J., Echeverri J. (2014) - Geothermal Development in Colombia. Presented at "Short Course VI on Utilization of Low- and Medium-Enthalpy Geothermal Resources and Financial Aspects of Utilization", organized by UNU-GTP and LaGeo, in Santa Tecla, El Salvador, March 23-29, 2014. Documento disponible en: www.os.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-18-07.pdf.
- Melosh G., Cumming W., Sussman D., Benoit D., Soto E., Colvin A., Wilmarth M., Winick J., Fredes L. (2009) - Rapid Exploration of the Tolhuaca Prospect, Southern Chile. GRC Transactions, Vol. 33, 2009.
- Melosh G., Moore J., Stacey R. (2012) - Natural Reservoir Evolution in the Tolhuaca Geothermal Field, Southern Chile. Proceedings, Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 30 - February 1, 2012 SGP-TR-194.
- Mercado J.L., Ahumada S., Aguilera F., Medina E., Renzulli A., Piscaglia F. (2009) - Geological and Structural Evolution of Apacheta-Aguilicho Volcanic Complex (AAVC) Northern Chile. XII Congreso Geológico Chileno, Santiago 22-26 Noviembre, 2009.
- Mighty River Power (2013) - Investment in Geothermal Sector - Example Chile & Tolhuaca Project. IRENA-OLADE Workshop in Lima. November, 2013. Documento disponible en: http://www.irena.org/DocumentDownloads/events/2013/November/OLADE/7_Trenkle.pdf.
- MINEM-JICA (2012) - The Master Plan for Development of Geothermal Energy in Peru. Final Report. Report prepared for Japan International Cooperation Agency and Ministry of Energy and Mines of Peru by West Japan Engineering Consultants, Inc., February 2012. Documento disponible en: http://open_jicareport.jica.go.jp/pdf/12048567.pdf.
- Ministerio de Minería de Chile (2008) - Estado de la Geotermia en Chile. Marzo, 2008. Documento disponible en: http://www.cepal.org/drni/noticias/noticias/0/34940/Presentacion_Chile.pdf.
- _____ (2009) - Licitación Internacional Concesiones de Exploración Geotérmica Puchuldiza Sur 1 y 2.
- _____ (2014) - Agenda de Energía, Un Desafío País, Progreso para Todos. Mayo, 2014. Documento disponible en: <http://www.minenergia.cl/documentos/estudios/2014/agenda-de-energia-un-desafio-pais.html>.
- Miranda F., Pesce A. (2000) - Catalogue of Thermal Manifestations of Argentina. Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu - Tohoku, Japan, May 28 - June 10, 2000.
- Moeck I., Beardsmore G., Harvey C., 2015 - Cataloguing Worldwide Developed Geothermal Systems by Geothermal Play. Proceedings World Geothermal Congress, 2015. Melbourne, Australia, 19-25 April, 2015.
- Monsalve M., Rodríguez G., Méndez R., Bernal N. (1998) - Geology of the Well Nereidas 1, Nevado del Ruiz Volcano, Colombia. Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 22, September 20-23, 1998.

- Montenegro A. (2008) - Actualización de los Antecedentes Geoquímicos y Geofísicos del Campo Geotérmico de Puchuldiza y su Comparación con el Área de Exploración Geotérmica de Guanacota, Región de Tarapacá. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología. Santiago de Chile, Octubre 2008. Documento disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104974>.
- Morata D. (2014) - South America Region: Geothermal Progress. Presentation at: GRC 38th Annual Meeting, 2015. Portland, Oregon, September 28 - October 1, 2014. Documento disponible en: [http://www.geothermal.org/Annual_Meeting/PDFs/South%20 America.pdf](http://www.geothermal.org/Annual_Meeting/PDFs/South%20America.pdf).
- Muñoz F. et al. (2014) - Desarrollo Geotérmico en Perú: Oportunidades, Conceptos, Acciones, Resultados y Recomendaciones. Documento disponible en: <http://piensageotermia.com/archives/23931>.
- Muñoz F. (2015) - Developing Geothermal Energy in a Country not your Own. En: Letter from Peru, Part II, by S. Hodgson. GRC Bulletin. May-June 2015.
- Otero S. (2015) - Fighting the Information Gap and the Steam Monster, the Chilean Experience on Geothermal Outreach. Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
- Panarello O., Sierra J.L., Pedro G. (1990) - Flow Patterns at the Tuzgle-Tocomar Geothermal System, Salta-Jujuy, Argentina. En: Geothermal Investigations with Isotope and Geochemical Techniques in Latin America. IAEA-TECDOC-641. Proceedings Final Research Coordination Meeting. San José, Costa Rica 12-16 November 1990. Documento disponible en: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/23/047/23047525.pdf.
- Pérez Y. (1999) - Fuentes de Aguas Termales de la Cordillera Andina del Centro-Sur de Chile (39°-42°S). SERNAGEOMIN, Subdirección Nacional de Geología. Boletín No. 54.
- Pesce A.S. (2015) - Argentina Country Update. Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
- Pesce A.H., Coira B., Caselli A.T. (2014) - Geotermia en Argentina. Desarrollo Actual y Potencial. ALCUENET Geothermal Energy Workshop – Salta, December, 2014. Documento disponible en: alcuenet.eu/dms-files.php?action=doc&id=681.
- Pesce A.H. (2013) - The Domuyo Geothermal Area, Neuquén, Argentina. Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 37, 2013.
- _____ (2010) - Argentina Country Update. Proceedings World Geothermal Congress 2010. Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.
- _____ (2003) - Catálogo de Manifestaciones Termales de la República Argentina. Volumen 1 - Región NO. Jujuy, Salta, Catamarca, Tucumán, Santiago del Estero, La Rioja y San Juan. SEGEMAR, Anales 36, 2003.
- Pidcock G. (2010) - The Challenges of High-Altitude Geothermal Operations in Chile. Geothermal Resources Council Bulletin 32, September/October, 2010.
- Pinto Vieira F. and Hamza V.M. (2014) - Advances in Assessment of Geothermal Resources of South America. Natural Resources, 2014, 5, 897-913. Published Online November 2014 in SciRes. <http://www.scirp.org/journal/nr>; <http://dx.doi.org/10.4236/nr.2014.514077>.
- Procesi M. (2014) - Geothermal Potential Evaluation for Northern Chile and Suggestions for New Energy Plans. Energies, 2014, 7, 5444-5459; doi:10.3390/en7085444. Documento disponible en: www.mdpi.com/1996-1073/7/8/5444/pdf.
- Raasch G. (2001) - The New Geothermal Law and Recent Geothermal Activities in Chile. Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 25, August 26-29, 2002.
- Rosas Calderón A.C., 2013 - La Geotermia y la Generación de Energía Eléctrica en el Volcán Azufra, Mito o Realidad. Ediciones Periódico El Churo, 2 de Julio 2013. <https://elchuroprensaalternativa.wordpress.com/2013/07/02/la-geotermia-y-la-generacion-de-energia-electrica-en-el-volcanazufra-mito-o-realidad/>.
- Salgado G., Raasch G. (2002) - Recent Geothermal Industry Activity and the Market for Electric Power in Chile. Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 26, September 22-25, 2002.
- Santana C. (2014) - Geothermal Energy in Chile. Presentación en Congreso GEOLAC 2014, San José, Costa Rica, Julio 16-17 2014, Documento disponible en: <https://geolac2014.pathable.com>.
- Sanyal S. (2005) - Classification of Geothermal Systems. A Possible Scheme. Proceedings Thirtieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University. Stanford, California, Jan 31- Feb 2, 2005. SGP-TR-176.

- Scandiffio G., Cassis W. (1990) - Geochemical Report on the Empexa Geothermal Area, Bolivia. En: Geothermal Investigations with Isotope and Geochemical Techniques in Latin America. IAEA-TECDOC-641. Proceedings Final Research Coordination Meeting. San José, Costa Rica 12-16 November 1990. Documento disponible en: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/23/047/23047525.pdf.
- Scandiffio G., Rodríguez J. (1990) - Geochemical Report on the Sajama Geothermal Area, Bolivia. En: Geothermal Investigations with Isotope and Geochemical Techniques in Latin America. IAEA-TECDOC-641. Proceedings Final Research Coordination Meeting. San José, Costa Rica 12-16 November 1990. Documento disponible en: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/23/047/23047525.pdf.
- Scandiffio G., Verastegui D. (1990) - Geochemical Report on the Challapalca and Tutupaca Geothermal Areas, Peru. En: Geothermal Investigations with Isotope and Geochemical Techniques in Latin America. IAEA-TECDOC-641. Proceedings Final Research Coordination Meeting. San José, Costa Rica 12-16 November 1990. Documento disponible en: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/23/047/23047525.pdf.
- Sepúlveda F., Dorsch K., Lahsen A., Bender S., Palacios C. (2004) - Chemical and Isotopic Composition of Geothermal Discharges from the Puyehue-Cordón Caulle Area (40.5°S), Southern Chile. *Geothermics* 33 (2004) 655-673.
- Sepúlveda F., Lahsen A., Dorsch K., Palacios C., Bender S. (2005) - Geothermal Exploration in the Cordón Caulle Region, Southern Chile. Proceedings World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.
- Sepúlveda F. (2006) - El Sistema Geotérmico de Cordón Caulle, Sur de Chile: Caracterización Geológica y Geoquímica. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias, Mención Geología. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Escuela de Posgrado. Santiago de Chile, Enero 2006. Documento disponible en: http://dspace2.conicyt.cl/bitstream/handle/10533/15134/SEPULVEDA_FABIAN_0432D.pdf?sequence=10.
- Sepúlveda F., Lahsen A., Powell T. (2007) - Gas Geochemistry of the Cordón Caulle Geothermal System, Southern Chile. *Geothermics* 36 (2007) 389-420.
- Sierra J.L. y Pedro G.E. (1998) - Energía Geotérmica. Documento disponible en: <http://www.epen.gov.ar/archivos/educativo/geotermia.pdf>.
- Sommaruga C. (2010) - Primi Italiani nello Sfruttamento di Risorse Geotermiche di Media e bassa Temperatura. In particolare: Pompe di Calore, Cicli Binari, Impianti a Vapore di Flash (1930-1960). Documento disponible en: <http://www.pionierieni.it/wp/wp-content/uploads/La-Geotermia-in-Italia-dal-1940-ad-oggi.-Di-Cludio-Sommaruga..pdf>.
- Stefansson V. (2005) - World Geothermal Assessment. Proceedings World Geothermal Congress. Antalya, Turkey, 24-29 April, 2005.
- Steinmuller K. and Zavala B. (1997) - Hidrotermalismo en el Sur del Perú. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú. Serie D: Estudios Regionales, Boletín No. 18.
- Steinmuller K. and Núñez S. (1998) - Hidrotermalismo en el Sur de Perú. Sector Cailloma - Puquío. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú. Serie D: Estudios Regionales, Boletín No. 19.
- Tassi F., Aguilera F., Darrah T., Vaselli O., Capaccioni B., Poreda R.J., Delgado Huerta A. (2010) - Fluid Geochemistry of Hydrothermal Systems in the Arica-Parinacota, Tarapacá and Antofagasta Regions (Northern Chile). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 192 (2010) 1-15.
- Taylor M. (2013) - IRENA's Power Generation Cost Analysis and Geothermal. Geothermal: Competing With Other Renewable and Non-Renewable Technologies Webinar, 19 November 2013. Documento disponible en: http://www.irena.org/costing/Presentation/TAYLOR_Michael_Geo-webinar-19-Nov-2013.pdf.
- Tocchi (1923) - Il Tatio. Larderello SpA, Ufficio Geologico. Documento inédito.
- Trujillo P. (1972) - Study of the Thermal Manifestations of Suriri; Unpublished Report; Committee for Geothermal Energy Resources (CORFO): Santiago, Chile, 1972; p. 15.
- Trujillo S. and Dewhurst W. (2014) - Reconnaissance Analysis of a Geothermal System within the Central Cordillera of Colombia: Nevado del Ruiz. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 38, 2014.
- Urbani F. (1991) - Geotermia en Venezuela. Boletín GEOS No. 31, Diciembre 1991. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Caracas, Venezuela.
- Urbani F., Varela P., Chiquito F., 1999 - Geotermia de la Región de El Pilar - Casanay, Estado Sucre. Caracas, 1999.

- Urbani F. (2009) - Fuentes de Información sobre las Manifestaciones Geotérmicas de Venezuela. Aula y Ambiente, Universidad Pedagógica Experimental Libertador, Caracas, 6(2) [2006]: 15-78. Documento disponible en: http://www.acading.org.ve/info/comunicacion/criterioopinion/sillon_XXVI/Bibliografia_Geotermia_Venezuela_URBANI.doc.
- Urzúa L., Powell T., Cummings B., Dobson P. (2002) - Apacheta, a New Geothermal Prospect in Northern Chile. Lawrence Berkeley National Laboratory. Documento disponible en: <http://www.escholarship.org/uc/item/5gf330v9>.
- Urzúa-Monsalve L., Vargas V., Barnett P. (2012) - Review of Geothermal Tenements Held by Hot Rock in Peru and Early Exploration Results. Geothermal Resources Council Transactions Vol. 36, 2012.
- Vargas V. and Cruz V. (2010) - Geothermal Map of Peru. Proceedings World Geothermal Congress, 2010. Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.
- Vargas V., Cruz V., Antayhua Y., Rivera M., Chirif H. (2012) - Estudio Geotérmico del Campo Borateras. INGEMMET, Boletín No. 47, Serie C, Geodinámica e Ingeniería Geológica. Lima, Perú. 2012.
- Vargas V., Cruz V., Antayhua Y., Rivera M., Cacya L. (2012) - Estudio Geotérmico del Campo Calientes. INGEMMET, Boletín No. 48, Serie C, Geodinámica e Ingeniería Geológica. Lima, Perú. 2012.
- Vega L. (2013) - Plan Maestro para el Desarrollo Geotérmico en el Perú. Presentación en "IV Mesa de Trabajo Técnica" sobre Recursos Geotérmicos en la Macro Región Sur. Moquegua, 11 de octubre 2013. Documento disponible en: www.diremmoq.gob.pe/geotermia/Plan_Maestro_para_el_Desarrollo_Geotermico_en_el_Peru.
- _____ (2015) - Desarrollo de la Energía Geotérmica en el Perú. Presentación en Congreso GEOLAC 2015, Managua, Nicaragua, 18-19 Noviembre 2015. Documento disponible en: <http://newenergyevents.com/geolac-2015-presentations/>.
- Verastegui O. (1988) - Development of Geothermal Resources in Perú. Proceedings 10th New Zealand Geothermal Workshop, 1988.
- Villaroel Camacho D.G. (2014) - Geothermal Development in Bolivia. Documento presentado en: "Short Course VI on Utilization of Low- and Medium Enthalpy Geothermal Resources and Financial Aspects of Utilization" organizado por UNU-GTP y LaGeo en Santa Tecla, El Salvador, 23-29 de Marzo, 2014. Documento disponible en: www.os.is/gogn/unu-gtp.../UNU-GTP-SC-18-05.pdf
- Zapata R. (1973) - Aguas Minerales del Perú. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú. Estudios Especiales. Tomo I y II. Ed. INGEMMET, Lima, 255.
- Zavala B. (2011) - Conocimiento y Divulgación del Patrimonio Geológico y Propuestas de Geoparques en Perú. INGEMMET, Taller Regional "Geoparques: Una alternativa para el desarrollo local Trinidad", 14 y 15 de noviembre de 2011. Documento disponible en: http://www.unesco.org.uy/ci/fileadmin/ciencias%20naturales/ciencias_de_la_tierra/Geoparques_2011/Peru.pdf.

Anexos

Anexo

Base de datos de proyectos geotermo-eléctricos de América del Sur

Referencias y listado de citas bibliográficas

IDENTIFICACIÓN PROYECTO				REFERENCIAS
PAÍS	ESTADO, REGIÓN O PROVINCIA	NOMBRE		
		Sistema Geotérmico	Sector	
Argentina	Neuquén	Copahue	Las Mellizas	5, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 36, 96, 99, 106, 122
Argentina	Neuquén	Domuyo	El Humazo	5, 10, 17, 18, 19, 20, 36, 96, 99, 106, 122
Argentina	San Juan	Los Despoblados	Los Despoblados	5, 36, 48, 99, 122
Argentina	Jujuy	Tuzgle	Tuzgle	5, 6, 7, 8, 9, 10, 21, 36, 48, 99, 122
Argentina	Salta - Jujuy	Tocomar	Tocomar	5, 8, 9, 10, 21, 36, 48, 99, 122
Bolivia	Potosí	Laguna Colorada	Sol de Mañana	22, 23, 24, 25, 26, 36, 97, 98, 122
Bolivia	Potosí	Río Empexa	Towa	5, 27, 29, 36, 97, 99, 122
Bolivia	Oruro	Sajama	Río Junthuma	5, 28, 36, 97, 99, 122
Chile	Región I	Surire	Chiguana	5, 36, 73, 82, 85, 102, 117, 122
Chile	Región I	Pumiri	Polloquere- Licancura	5, 89, 102, 117, 122
Chile	Región I	Puchuldiza	Puchuldiza-Tuja	5, 36, 73, 74, 78, 80, 81, 82, 85, 102, 117, 122
Chile	Región II	Apachela	Cerro Pabellón	5, 63, 69, 70, 73, 85, 91, 101, 102, 117, 122
Chile	Región II	El Taño	El Taño-La Torta	5, 36, 63, 71, 72, 73, 91, 101, 102, 122
Chile	Región VI	Tinguiririca	Tinguiririca	83, 84, 101, 104, 105, 117, 122
Chile	Región VII	Calabozo	Lloli	63, 91, 101, 105, 108, 117, 122
Chile	Región VII	Pellado	Mariposa	63, 86, 87, 90, 95, 101, 105, 122
Chile	Región VIII	Chillán	Chillán	36, 91, 101, 105, 108, 117, 118, 122
Chile	Región VIII-IX	Tolhuaca	Curacautín	63, 64, 65, 66, 79, 101, 105, 109, 122
Chile	Región X	Cordón Caulle	Cordón Caulle	67, 68, 105, 108, 119, 122
Colombia	Nariño	Azufal	Azufal	5, 38, 39, 40, 43, 44, 47, 49, 51, 52, 110, 111, 122
Colombia	Caldas	Ruiz	NW Sector	5, 36, 37, 38, 39, 40, 44, 45, 47, 49, 50, 110, 111, 122
Colombia	Boyacá	Paipa	Paipa	37, 40, 43, 44, 46, 47, 49, 53, 107, 111, 122
Colombia / Ecuador	Nariño / Carchi	Tufiño	Chiles-Cerro Negro	5, 36, 37, 40, 41, 44, 49, 54, 55, 56, 60, 111, 112, 113, 122
Ecuador	Imbabura	Chachimiro	Chachimiro	5, 36, 54, 55, 57, 60, 76, 112, 113, 120, 122
Ecuador	Napo	Chacana	Cachiyacu- Jamanco	54, 55, 58, 59, 60, 76, 112, 113, 120, 122
Perú	Ayacucho	Puquio	Puquio	61, 100, 103, 114, 122
Perú	Arequipa	Pinchollo	Pinchollo	61, 100, 114, 122
Perú	Moquegua	Ticsani	Calacoa-Puñina	61, 75, 100, 114, 122
Perú	Tacna	Tutupaca	Tutupaca	61, 100, 103, 114, 122
Perú	Moquegua	Collo	Tiñre-Arunlaya	61, 100, 114, 122
Perú	Moquegua- Puno	Crucero	Crucero	61, 100, 114, 122
Perú	Puno	Pinaya	Pinaya	61, 75, 100, 103, 114, 121, 122
Perú	Tacna	Calientes	Calientes	61, 77, 100, 114, 122
Perú	Tacna	Ancocollo	Ancocollo	61, 100, 114, 122
Perú	Tacna	Borateras	Borateras	61, 77, 100, 114, 122
Perú	Tacna	Casiri	Chungara- Kallapuma	61, 62, 77, 100, 114, 122
Venezuela	Sucre	El Pilar- Casanay	Las Minas - Mundo Nuevo	5, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 115, 122

BASE DE DATOS DE PROYECTOS GEOTERMOLÉCTRICOS DE AMÉRICA DEL SUR - REFERENCIAS			
Ref.	Autores, Fecha	Título	Medio de Publicación
1	Goff F., Janick C.J., 2000	Geothermal Systems.	En: Encyclopedia of Volcanoes (Editor H. Sigurdsson). Pergamon Press, New York, 2000. pp .817-834.
2	Sanyal S., 2005	Classification of Geothermal Systems. A Possible Scheme.	Proceedings Thirtieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California, Jan 31- Feb 2, 2005. SGP-TR-176.
3	ESMAP, 2012	Geothermal Handbook: Planning and Financing Power Generation. Technical Report 002/2012.	http://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/DocumentLibrary/FINAL_Geothermal%20Handbook_TR002-12_Reduced.pdf
4	Taylor M., 2013	IRENA's Power Generation Cost Analysis and Geothermal. Geothermal. Competing With Other Renewable And Non-Renewable Technologies Webinar. 19 November 2013.	http://www.irena.org/ossing/Presentation/TAYLOR_Michael_Geo-webinar-19-Nov-2013.pdf
5	World Bank - sitio web	LAC Geothermal Inventory.	https://datahub.worldbank.org/dataset/LAC-GeothermalInventory/mv4t-vfyg
6	Coira B., 1995	Cerro Tuzgle Geothermal Prospect, Jujuy, Argentina.	World Geothermal Congress 1995, 2: 1161-1165. Florence, Italy.
7	Coira B., Kay S.M., 1993	Implications of Quaternary Volcanism at Cerro Tuzgle for Crustal and Mantle Evolution of the High Puna Plateau, Central Andes, Argentina.	Contributions Mineralogy Petrology 113. pp. 40-48.
8	Giordano G. et al., 2013	Structural Control on Geothermal Circulation in the Cerro Tuzgle - Tocomar Geothermal Volcanic Area (Puna Plateau, Argentina).	Journal of Volcanology and Geothermal Research 249 (2013), pp. 77-94
9	SEGEMAR, 2000	Catálogo de Manifestaciones Térmicas de la República Argentina (Jujuy, Salta, Catamarca, Tucumán, Santiago del Estero, La Rioja y San Juan). Volumen 1 - Región NO. Edición 2000.	Publicación Servicio Geológico Minero Argentino.
10	Pesce A., 2010	Argentina Country Update.	Proceedings World Geothermal Congress 2010. Bali, Indonesia, 25-29 April, 2010.
11	Panarello H., 2002	Características Isotópicas y Termodinámicas de Reservorio del Campo Geotérmico de Copahue-Caviahue, Provincia del Neuquén.	Revista de la Asociación Geológica Argentina, 57, 2, pp. 182-194, 2002.
12	Melnick D. et al., 2006	Structural Control on Arc Volcanism: The Caviahue-Copahue Complex, Central to Patagonian Andes Transition (38° S).	Journal of South American Earth Sciences 22 (2006). Pp. 66-88.
13	Mas L., 2005	Present Status of the Copahue Geothermal Project.	Proceedings World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey, 24-29 April, 2005.
14	Mas L. et al., 2005	Heat Flow of Copahue Geothermal Field, its Relation with Tectonic Scheme.	Proceedings World Geothermal Congress 2000. Kyushu-Tohoku, Japan, May 28 - June 10, 2000.
15	Nakanishi S. et al., 1995	Copahue Geothermal System, Argentina. Study of a Vapor-Dominated Reservoir.	Proceedings World Geothermal Congress 1995. Florence, Italy, May 18-31, 1995.
16	ADI-NQN - sitio web	Proyecto de Generación de Energía Eléctrica a Partir del Aprovechamiento del Recurso Geotérmico de Copahue.	http://adhnqn.gov.ar/geoterma_copahue.htm
17	Pesce A.H., 2013	The Domuyo Geothermal Area, Neuquén, Argentina.	GRC Transactions, Vol. 37, 2013.
18	ADI-NQN - sitio web	Proyecto de Generación de Energía Eléctrica a Partir del Aprovechamiento del Recurso Geotérmico de Domuyo.	http://adhnqn.gov.ar/geoterma_domuyo.htm
19	Mas L., 2010	History and Present Situation of the Neuquén Geothermal Project.	Proceedings World Geothermal Congress 2010. Bali, Indonesia, 25-29 April, 2010.
20	Panarello H. et al., 1990a	Isotopic and Geochemical Study of the Domuyo Geothermal Field, Neuquén, Argentina.	Estudios Geotérmicos con Técnicas Isotópicas y Geoquímicas en América Latina. IAEA-TECDOC-641. Proceedings Final Research Coordination Meeting. San José, Costa Rica 12-16 November 1990.

BASE DE DATOS DE PROYECTOS GEOTERMIOELÉCTRICOS DE AMÉRICA DEL SUR - REFERENCIAS			
Ref.	Autores, Fecha	Título	Medio de Publicación
21	Panarello H. et al., 1990b	Flow Pattern at the Tuzgle-Tocomar Geothermal System, Salta-Jujuy, Argentina.	Estudios Geotérmicos con Técnicas Isotópicas y Geoquímicas en América Latina. IAEA-TECDOC-641. Proceedings Final Research Coordination Meeting. San José, Costa Rica 12-16 November 1990.
22	Vilaroel D.G., 2014	Geothermal Development in Bolivia.	Presentado en: "Short Course VI on Utilization of Low- and Medium-Enthalpy Geothermal Resources and Financial Aspects of Utilization". Organizado por UNU-GTP y LaGeo, Santa Tecla, El Salvador, 23-29 Marzo, 2014.
23	Delgado Z., 2000	State of the Geothermal Resources in Bolivia - Laguna Colorada Project	Proceedings World Geothermal Congress 2000. Kyushu-Tohoku, Japan, May 28 - June 10, 2000.
24	Delgado Z., Puente H., 1998	The Laguna Colorada (Bolivia) Project: A Reservoir Engineering Assessment	Geothermal Resources Council Transactions - Vol 22, September 20-23, 1998.
25	Scandiffo G., Alvarez M., 1990	Informe Geoquímico sobre la Zona Geotérmica de Laguna Colorada, Bolivia.	Geothermal Investigations with Isotope and Geochemical Techniques in Latin America. IAEA-TECDOC-641. Proceedings Final Research Coordination Meeting. San José, Costa Rica 12-16 November 1990.
26	Di Paola M. et al., 1990	Geothermal Feasibility Study of Laguna Colorada - Bolivia.	Geothermal Resources Council Transactions - Vol. 14, Part II, August 1990.
27	Scandiffo G., Cassis W., 1990	Geochemical Report on the Empexa Geothermal Area, Bolivia.	Geothermal Investigations with Isotope and Geochemical Techniques in Latin America. IAEA-TECDOC-641. Proceedings Final Research Coordination Meeting. San José, Costa Rica 12-16 November 1990.
28	Scandiffo G., Rodríguez J., 1990	Geochemical Report on the Sajama Geothermal Area, Bolivia.	Geothermal Investigations with Isotope and Geochemical Techniques in Latin America. IAEA-TECDOC-641. Proceedings Final Research Coordination Meeting. San José, Costa Rica 12-16 November 1990.
29	JOGMEC et al., 2011	Estudio sobre Recurso Geotérmico para Suministro de Calor y Energía en la Región de Uyuni del Estado Plurinacional de Bolivia. Reporte Final.	Estudio de Proyectos de Infraestructura de Iniciativa Privada en Países en Desarrollo en el Año Fiscal 2010. Informe preparado para: Ministry of Economy, Trade and Industry.
30	D'Amore F. et al., 1990	Geothermal Exploration by Geochemical Methods of the Thermal Area El Pilar - Mundo Nuevo, State of Sucre, Venezuela.	Geothermal Investigations with Isotope and Geochemical Techniques in Latin America. IAEA-TECDOC-641. Proceedings Final Research Coordination Meeting. San José, Costa Rica 12-16 November 1990.
31	D'Amore F. et al., 1994	The Geothermal Area of El Pilar - Casanay, State of Sucre, Venezuela. Geochemical Exploration and Model.	Geothermics, Vol. 23, No. 3, pp. 283-304, 1994.
32	Urbani F., 1990	Geothermal Resources in the Pilar Region.	IGA News, Newsletter of the International Geothermal Association. Quarterly No. 38, Oct-Dec 1999.
33	Urbani F., 1991	Geotermita en Venezuela.	Escuela de Geología, Minas y Geofísica - Fundación GEOS. Boletín No.31-Diciembre 1991.
34	Urbani F. et al., 1999	Geotermita en la Región de El Pilar - Casanay, Estado Sucre.	Informe MEM-PDVSA. Caracas, Febrero 1999.
35	Urbani F., 2015	Prof. Franco Urbani. Comunicaciones Personales con Paolo Bona.	Universidad Central de Venezuela Escuela de Geología, Caracas. urbanifranco@yahoo.com
36	Balboelli L., Lawrence B., 1999	Geothermal Resources in Latin America & the Caribbean.	Report prepared for: Sandia National Laboratories and the US Department of Energy, Office of Geothermal Technologies. Contract No. AS-0989. February, 1999.
37	ISAGEN, 2014	Geotermita en Colombia.	IRENA Training Workshop. Santiago May 2014. www.irena.org/DocumentDownloads/events/2014/.../16_%20Castro.pdf
38	Alfaro C., 2000	Colombia. County Update.	Proceedings World Geothermal Congress 2000. Kyushu-Tohoku, Japan, May 28 - June 10, 2000.
39	Alfaro C., Bernal N., 1999	Surface Manifestations of Deep Fluid from Colombian Hydrothermal Systems - Review.	Geothermal Resources Council Transactions, Vol 23, October 17-20, 1999.
40	Marzolf N., 2014	Emprendimiento de la Energía Geotérmica en Colombia.	Monografía Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Convenio ISAGEN - BID/IC Colombia.

BASE DE DATOS DE PROYECTOS GEOTERMOELÉCTRICOS DE AMÉRICA DEL SUR - REFERENCIAS			
Ref.	Autores, Fecha	Título	Medio de Publicación
41	Mejía E. et al., 2014	Geothermal Development in Colombia.	Presentado en: "Short Course VI on Utilization of Low- and Medium-Enthalpy Geothermal Resources and Financial Aspects of Utilization". Organizado por UNU-GTP y LaGeo, Santa Tecla, El Salvador, 23-29 Marzo, 2014.
42	ISAGEN, 2012	Proyecto Geotérmico Macizo Volcánico del Ruiz	Cartilla ISAGEN, Septiembre 2012. https://www.isagen.com.co/comunicacion/PROYECTO_GEOTERMIA_Cartilla_-_Abril_de_2010.pdf
43	Aguirre A., Barragan R., 2006	Geochemical Data Interpretation of Thermal Springs in Colombia.	Proceedings Thirty-First Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 30-February 1, 2006. SGP-TR-179.
44	BID-ISAGEN, 2012	Notas para la Investigación y Desarrollo de Proyectos Geotérmicos en Colombia.	Documento Convenio ISAGEN-BID/JC. Cooperación Técnica no Reembolsable No. ATN/JC-12150-CO. https://www.isagen.com.co/comunicacion/Libro_geoterminia_sep18.pdf
45	Monsalve M.L. et al., 1998	Geology of Well Nereidas 1. Nevado del Ruiz Volcano, Colombia.	Geothermal Resources Council Transactions, Vol 22, September 20-23, 1998.
46	Berrami R. et al., 1990	Geochemical and Isotopic Exploration of the Geothermal Area of Paipa, Cordillera Oriental, Colombia.	Geothermal Investigations with Isotope and Geochemical Techniques in Latin America. IAEA-TECDOC-641. Proceedings Finar Research Coordination Meeting, San José, Costa Rica 12-16 November, 1990.
47	Alfaro C. et al., 2005	Colombian Geothermal Resources.	Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 April, 2005.
48	Sangalino G., 2015	Giorgio Sangalino, Gerente General, Geoterminia Andina S.A. - Comunicaciones Personales con Paolo Bona.	Geoterminia Andina S.A. Miguéles 2267. C1428ASI - Buenos Aires, Argentina. Tel.: 54 11 4785-9608. www.geoterminandina.com.ar - gsangalino@geoterminandina.com.ar
49	Alfaro C., 2015	Dra. Claudia Alfaro. Coordinadora Grupo de Investigación de Recursos Geotérmicos del Servicio Geológico Colombiano. Comunicaciones Personales con Paolo Bona.	Servicio Geológico Colombiano. callaro@sgc.gov.co
50	Alfaro C. et al., 2002	Inventario de Fuentes Termales en el Parque Natural Nacional de Los Nevados.	Documento INGEOMINAS, Bogotá, Septiembre 2002.
51	Bernal N., 1998	Azufral Volcano, a Geothermal Resource for Southern Colombia.	Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 22, September 20-23, 1998.
52	Alfaro C. et al., 2008	Geoquímica Preliminar de Gases del Sistema Geotérmico del Volcán Azufral.	Universidad Nacional de Colombia, Geología Colombiana No. 33, Diciembre 2008.
53	Alfaro C. et al., 2010	Preliminary Conceptual Model of the Paipa Geothermal System, Colombia.	Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April, 2010.
54	Lleret A., Labus J., 2014	Geothermal Development in Ecuador: History, Current Status and Future.	Presentado en: "Short Course VI on Utilization of Low- and Medium-Enthalpy Geothermal Resources and Financial Aspects of Utilization". Organizado por UNU-GTP y LaGeo, Santa Tecla, El Salvador, 23-29 Marzo, 2014.
55	Beate B., Salgado R., 2010	Geothermal Country Update for Ecuador, 2005-2010.	Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April, 2010.
56	CEPAL, 2000	Proyecto OLADE-CEPAL-GTZ. Estudio para la Evaluación del Entorno del Proyecto Binacional "Tulffo - Cerro Negro".	Informe Interno Naciones Unidas - Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
57	Aguilera E. et al., 2005	Chemical and Isotope Characteristics of the Chachimbaro Geothermal Fluids (Ecuador).	Geothermics, 34, 2005, pp. 495-527.
58	Gherardi F., Spycher N., 2014	Application of Integrated Multicomponent Geothermometry at the Chachimbaro Thermal Area, A Difficult Geothermal Prospection Case.	Proceedings, Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 24-26, 2014. SGP-TR-202.
59	Beate B. et al., 2010	The Cachiyacu Geothermal Prospect, Chacana Caldera, Ecuador.	Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April, 2010.
60	Beate B., Urquiza M., 2015	Geothermal Country Update for Ecuador, 2010-2015.	Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April, 2015.

BASE DE DATOS DE PROYECTOS GEOTERMOELÉCTRICOS DE AMÉRICA DEL SUR - REFERENCIAS			
Ref.	Autores, Fecha	Título	Medio de Publicación
61	MINEM-JICA, 2012	The Master Plan for Development of Geothermal Energy in Peru. Final Report	Independent report, prepared for Japan International Cooperation Agency and Ministry of Energy and Mines of Peru by West Japan Engineering Consultants, Inc., February 2012.
62	Volcanodiscovery - sitio web	Nevaros Casiri Volcano.	http://www.volcanodiscovery.com/nevaros_casiri.html
63	Hodgson S., 2013	Focus on Chile, Part I, II, and III.	Geothermal Resources Council Bulletin, Vol. 42, No. 1, Jan-Feb 2013; No. 2, Mar-Apr 2013; No. 3, May-June 2013.
64	Santana C., 2014	Geothermal Energy in Chile.	Presentation at GEOLAC Conference, San José, Costa Rica, July 2014. https://geolac2014.pathable.com .
65	Mebosh G. et al., 2010	Exploration Results and Resource Conceptual Model of the Tohuaca Geothermal Field, Chile.	Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April, 2010.
66	Mebosh G. et al., 2012	Natural Reservoir Evolution in the Tohuaca Geothermal Field, Southern Chile.	Proceedings, Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 30 - February 1, 2012 SGP-TR-194.
67	Sepulveda F. et al., 2005	Geothermal Exploration in the Cordón Caulle Region, Southern Chile.	Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 April, 2005.
68	Sepulveda F. et al., 2007	Gas Geochemistry of the Cordón Caulle Geothermal System, Southern Chile.	Geothermics, 36 (2007), pp. 389-420.
69	Urzua L. et al., 2002	Apachea a New Geothermal Prospect in Northern Chile.	Geothermal Resources Council Transactions, Vol 26, September 22-25, 2002.
70	Mercado J.L. et al., 2009	Geological and Structural Evolution of Apachea-Aguiluco Volcanic Complex (AAVC) Northern Chile.	XII Congreso Geológico Chileno, Santiago 22-26 Noviembre, 2009.
71	Cumming W.B. et al., 2002	Exploration of the La Torre Geothermal Prospect, Northern Chile.	Geothermal Resources Council Transactions, Vol 26, September 22-25, 2002.
72	Cortecchi G. et al., 2005	New Chemical and Original Isotopic Data on Waters from El Tatio Geothermal Field, Northern Chile.	Geochemical Journal, Vol. 39, pp. 547-571, 2005.
73	Aguilera F., 2008	Origen y Naturaleza de los Fluidos en los Sistemas Volcánicos, Geotermiales y Termales de Baja Entalpía en la Zona Volcánica Central (ZVC) entre los 17°43' S y 25° 10' S.	Universidad Católica del Norte. Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias mención Geología. Antofagasta, Chile, 2008.
74	Gobierno de Chile - Ministerio Minería	Licitación Internacional Concesiones de Exploración Energía Geotérmica Puchulidza Sur 1 Puchulidza Sur 2.	Documento Público Ministerio de Minería de Chile.
75	Urzúa L. et al., 2012	Review of Geothermal Tenements Held by Hot Rock in Peru and Early Exploration Results.	Geothermal Resources Council Transactions, Vol 36, 2012.
76	Aguilera E., 2015	Prof. Eduardo Aguilera. Escuela Politécnica del Ejército. Comunicaciones Personales con Paob Bona.	Escuela Politécnica del Ejército (ESPE) Sangobquí, Ecuador. epaquilera@hotmail.com
77	Scandiffo G., Verastegui D., 1990	Geochemical Report on the Chalipalca and Tupaca Geothermal Areas, Peru.	Geothermal Investigations with Isotope and Geochemical Techniques in Latin America. IAEA-TECDOC-641. Proceedings Final Research Coordination Meeting, San José, Costa Rica 12-16 November 1990.
78	Mighty River Power - sitio web	Proyecto Puchulidza, Cochane, Región de Tarapacá.	http://geotermia.cl/provecbi/provecbi-greenfield/
79	Mighty River Power - sitio web	Central Geotérmica Curacautín, Regiones del Bio Bio y Araucanía.	http://geotermia.cl/provecbi/provecbi-greenfield-ii/
80	JICA, 1981	Republic of Chile. Report on Geothermal Power Development Project in Puchulidza Area, March, 1981.	http://www.achegeo.cl/1981.pdf

BASE DE DATOS DE PROYECTOS GEOTERMOELÉCTRICOS DE AMÉRICA DEL SUR - REFERENCIAS			
Ref.	Autores, Fecha	Título	Medio de Publicación
81	Cortés R. et al., 2009	Exploración Geológica para el Fomento de la Energía Geotérmica en el área Puchukiza Sur.	XII Congreso Geológico Chileno. Santiago, 22-26 Noviembre, 2009.
82	Tassi F. et al., 2010	Fluid Geochemistry of Hydrothermal Systems in the Arica-Parinacota, Tarapacá and Antofagasta Regions (Northern Chile).	Journal of Volcanology and Geothermal Research 192 (2010), pp. 1-15.
83	Clavero J. et al., 2011	Geological, Geochemical, Geophysical and First Drilling Data from Tinguirrica Geothermal Area, Central Chile.	GRC Transactions. Vol. 35, 2011.
84	Drogue B. et al., 2012	Mineralogía de Alteración en el Pozo Pie-1, Campo Geotermal Tinguirrica, Chile.	http://digiubug.ugr.es/bitstream/10481/26296/1/Drogue_et_al_2012_CGC.pdf
85	Procesi M., 2014	Geothermal Potential Evaluation for Northern Chile and Suggestions for New Energy Plans.	Energies, 2014, 7, 5444-5459; doi:10.3390/en7085444.
86	SKM, 2010	Mariposa Geothermal Resource. Laguna del Maule and Pellaó Concessions, Chile.	http://ca.hostbcked.com/docs/show/magma_energy_corp/other/resources/assessment.pdf
87	Altera Power Corp. - sitio web	Mariposa - Chile Data Sheet	http://www.alterrapower.ca/files/assets/_pdf/South%20America%20Asse%20Mariposa%20DP%20-%20Chile.pdf
88	Hickson C. et al., 2012	Mariposa Geothermal System: A Large Geothermal Resource in Central Chile (320 MW Inferred).	XIII Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, Chile, August 5 - 9, 2012 (poster presentation).
89	Maureira G., 2013	Alteración Hidrotérmica y Geoquímica de las Aguas Termales en el Área de la Concesión Geotérmica Licanoura III, Región de Tarapacá, Chile.	Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología, Junio 2013. http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/114782/cf-maureira_gm.pdf?sequence=1&Allowed=y
90	Hickson C. et al., 2011	The Mariposa Geothermal System, Chile.	GRC Transactions, Vol. 35, 2011.
91	Salgado G., Raasch G, 2002	Recent Geothermal Industry Activity and the Market for Electric Power in Chile.	GRC Transactions, Vol. 26, 2002.
92	Volcanodiscovery - sitio web	Sierra Nevada Volcano.	http://www.volcanodiscovery.com/es/sierra_nevada.html
93			
94			
95	EDC, 2015	Información sobre Proyecto Mariposa (Concesiones de Explotación Maule y Pellaó).	Información proporcionada por Energy Development Corporation (email Lian de Castro, 17 Abril, 2015)
96	CAMMESA, 2014	Informe Anual 2013.	http://www.cammesa.com/infobanru.nsf/MINFOANU7OpenFrameSet
97	CNDC - sitio web	Comité Nacional de Despacho de Carga de Bolivia - Estadísticas.	http://www.cndc.bo/estadisticas/index.php
98	iisec, 2012	El Sector Eléctrico en Bolivia.	Instituto de Investigaciones Socioeconómicas. Documento de Trabajo 04/12, Abril 2012.
99	Pesce A.H., 2015	Argentina Country Update.	http://www.iisec.ucb.edu.bo/papers/2011-2015/iisec-dt-2012-04.pdf
100	Cruz V., Vargas V., 2015	Geothermal Country Update for Peru, 2010-2014.	Proceedings World Geothermal Congress, 2015. Melbourne, Australia, 19-25 April, 2015.

BASE DE DATOS DE PROYECTOS GEOTERMOELÉCTRICOS DE AMÉRICA DEL SUR - REFERENCIAS			
Ref.	Autores, Fecha	Título	Medio de Publicación
101	Lahsen A. et al., 2015	Geothermal Exploration in Chile. Country Update.	Proceedings World Geothermal Congress, 2015. Melbourne, Australia, 19-25 April, 2015.
102	CDEC-SING - sitio web	Centro de Despacho Económico de Carga del Sistema Interconectado del Norte Grande (CDEC-SING), Chile. Informes de Operación.	http://cdec2.cdec-sing.cl/ols/portal/cdec.cck_web.cdec_paginas.página?p_k=5029
103	Cruz V., 2015	Dra. Vicentina Cruz. Investigadora Geotermia INGEMMET. Comunicaciones Personales con Paolo Bona	Instituto Geológico Mhnero y Metalúrgico - INGEMMET (Peru). vcruz@ingemmet.gob.pe
104	Ministerio de Energía de Chile, 2013	Obtenga Concesión de Explotación Geotérmica Tinguiririca.	Diario Oficial de la República de Chile No. 40.705. Miércoles 13 de Noviembre de 2013.
105	CDEC-SIC - sitio web	Centro de Despacho Económico de Carga del Sistema Interconectado Central (CDEC-SIC), Chile. Informes de Operación.	http://www.cdec-sic.cl/
106	CNEA, 2015	Síntesis del Mercado Eléctrico Mayorista de la República Argentina. Marzo 2015.	http://www.cnea.gov.ar/sistemas/default/files/sintesis_MEM-2_2015.pdf
107	Pardo N. et al., 2005	The Patpa Volcano, Eastern Cordillera of Colombia, south America: Volcanic Stratigraphy.	Earth Science Research Journal, Vol. 9, No. 1, June 2005, 3-18.
108	Lahsen A. et al., 2005	Present Status of Geothermal Exploration in Chile.	Proceedings World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey, 24-29 April, 2005.
109	Mighty River Power, 2013	Investment in Geothermal Sector - Example Chile & Toluca Project.	IRENA-OLADE Workshop, Lima, Noviembre, 2013. http://www.irena.org/DocumentDownloads/events/2013/November/OLADEF_Trentle.pdf
110	Alfaro C. et al., 2015	A Preliminary Conceptual Model of Azufral Geothermal System, Colombia.	Proceedings World Geothermal Congress, 2015. Melbourne, Australia, 19-25 April, 2015.
111	XM Filial de ISA - sitio web	Operador Mercado Eléctrico de Colombia - Informes Mensuales de Análisis de Mercado.	http://www.xm.com.co/Pages/Informes.aspx
112	CELEC, 2014	Estado Actual de la Geotermia en Ecuador y Colombia.	Geothermal Energy Workshop, Salta, December 2014. file:///C:/Users/PabloBona/Downloads/12%20-%20Specific%20LAC%20Experiences%20-%20COLOMBIA%20ECUADOR%20-%20OLIVEROS%20URQUIZO%20(1).pdf
113	CONELEC - sitio web	Consejo Nacional de Electricidad de Ecuador - Estadística Precios Promedio Anual.	http://www.conelec.gob.ec/enlaces_externos.php?f=1&cd_menu=4233
114	COES-SINAC - sitio web	Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional del Perú - Boletines.	http://www.coes1.org.pe/post-operacion/Publicaciones/WebPages/boletines.aspx?RootFolder=%2Fpost-operacion%2FPublicaciones%2FBolet%2F015%2F01%20Enero&FolderCTID=0x0120001C2A310DD6059849951AB1A4EE52D9C8&View=537D9212-8C98-475D-8529-31D80D98D741
115	Noticias 24 Venezuela - sitio web	Venezuela es el mayor Consumidor de Electricidad en América Latina: La Demanda Supera los 18,000 MW - 21 Mayo, 2014.	http://www.noticias24.com/venezuela/noticia/299838/venezuela-es-el-pais-con-mayor-consumo-de-energia-electrica-en-latinoamerica/
116	Cataldi R. et al., 1987	Resources and Development Perspectives of Geothermal Energy in Central and South America.	Revista Brasileira de Geofísica, Sao Paulo, 5, pp. 245-265.
117	Merata D., 2014	South America Region: Geothermal Progress.	Presentation at: GRC 38th Annual Meeting, 2015. Portland, Oregon, September 28 - October 1, 2014. Document available at http://www.geothermal.org/Annual_Meeting/PDFs/South%20America.pdf
118	Berrós C., 2015	Caracterización Geoquímica de Sistemas Geotermiales en Zonas de Transición: Volcanes Nevados de Chillán y Copahue.	Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología. Santiago de Chile, 2015. http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/134130
119	Sepulveda F., 2006	El Sistema Geotérmico de Cordón Caulle, Sur de Chile: Caracterización Geológica y Geoquímica.	Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias. Mención Geología. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Escuela de Posgrado. Santiago de Chile, Enero 2006. http://dspace2.conicyt.cl/bitstream/handle/10533/15134/1/SEFULVEDA_FABIAN_0432D.pdf?sequence=10
120	Almeida E. et al., 1990	Modelo Geotérmico Preliminar de Áreas Volcánicas del Ecuador a partir de Estudios Químicos e Isotópicos de Manifestaciones Termiales.	Geothermal Investigations with Isotope and Geochemical Techniques in Latin America. IAEA-TECDOC-641. Proceedings Final Research Coordination Meeting. San José, Costa Rica 12-16 November 1990.

BASE DE DATOS DE PROYECTOS GEOTERMOELÉCTRICOS DE AMÉRICA DEL SUR - REFERENCIAS

Ref.	Autores, Fecha	Título	Medio de Publicación
121	Cruz C., Malsuda K., 2014	Estudio Geoquímico de las Fuentes Termales de la Zona Geotermal de Phaya, Santa Lucía (Puno).	XVII Congreso Peruano de Geología. 12-15 de octubre 2014. Lima, Perú. http://tramite.ingenmetgob.pe/BusquedaGeodoc/images/biblioteca/CPG17-044.pdf
122	IRENA, 2015	Energías Renovables en América Latina 2015: Sumario de Políticas.	Publicación IRENA, junio de 2015. Documento disponible en: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Latin_America_Policies_2015_ES.pdf

Abreviaciones y acrónimos

ADI-NQN SEP:	Agencia de Promoción de Inversiones y Desarrollo de Neuquén (Argentina)
BID:	Banco Interamericano de Desarrollo
BCIE:	Banco Centroamericano de Integración Económica
BRGM:	Bureau de Recherches Géologiques et Minières (Servicio Geológico de Francia)
CADAFE:	Compañía Anónima de Administración y Fomento Eléctrico de Caracas (Venezuela)
CAF:	Banco de Desarrollo de América Latina
CELEC EP:	Corporación Eléctrica del Ecuador
CENERGIA:	Centro de Conservación de Energía y del Ambiente (Perú)
CEPAL:	Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Naciones Unidas)
CFE:	Comisión Federal de Electricidad (México)
CFG:	Compagnie Française pour le Développement de la Géothermie et des Energies Nouvelles
CHEC:	Central Hidroeléctrica de Caldas (Empresa eléctrica colombiana)
CIF:	Centro Internacional de Física (Colombia)
CODELCO:	Corporación Nacional del Cobre de Chile
COLCIENCIAS:	Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colombia)
CONICET:	Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Argentina)
COMIBOL:	Corporación Minera de Bolivia
CONELEC:	Consejo Nacional de Electricidad (Ecuador)
CORFO:	Corporación de Fomento de la Producción (Chile)
CORPOELEC:	Corporación Eléctrica Nacional (Venezuela)
CREG:	Comisión de Regulación de Energía y Gas (Colombia)
CREGEN;	Centro Regional de Energía Geotérmica del Neuquén (Argentina)
ECOPETROL:	Empresa Colombiana de Petróleo

EDC:	Energy Development Corporation (Empresa geotérmica de Filipinas)
EIA:	Energy Information Administration (Administración de Información Energética, organismo de estadística y de análisis en el Departamento de Energía de los Estados Unidos de Norteamérica)
ENAP:	Empresa Nacional de Petróleo (Chile)
ENARSA:	Energía Argentina S.A.
ENDE:	Empresa Nacional de Electricidad (Bolivia)
ENEL:	Ente Nazionale per l'Energía Elettrica (Ente Nacional de Electricidad de Italia)
ENG:	Empresa Nacional de Geotermia (Empresa geotérmica de participación estatal chilena)
EPM:	Empresas Públicas de Medellín (Empresa eléctrica colombiana)
EPSE:	Energía Provincial Sociedad del Estado (empresa eléctrica provincial de San Juan, Argentina)
ERNOC:	Energías Renovables No Convencionales
ESMAP:	Energy Sector Management Assistance Program (Programa de Asistencia para la Gestión del Sector de Energía, administrado por el Banco Mundial)
FIT:	Feed in Tariff (Tarifa regulada)
FONDEF:	Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (Chile)
GASA:	Geotermia Andina, S.A. (Empresa geotérmica argentina, subsidiaria de la compañía canadiense Andean Geothermal Power Inc.)
GDF:	Geothermal Development Fund (Fondo de mitigación de riesgos geotérmicos para América Latina, liderado por KfW)
GDN:	Geotérmica del Norte, S.A. (Empresa geotérmica de participación estatal chilena)
GDP:	Geotermia del Pacífico (Empresa geotérmica que operó en Chile entre 2001 y 2007)
GEA:	Geothermal Energy Association (Asociación de Energía Geotérmica)
GEF:	Fondo Mundial para el Medio Ambiente (Global Environmental Facility)
GENREN:	Programa Oficial de Energías Renovables (Argentina)
GEOBOL:	Servicio Geológico de Bolivia
GESA:	Geoenergía Andina S.A.(Empresa geotérmica colombiana subsidiaria de CHEC)
GGE:	GeoGlobal Energy (Empresa geotérmica estadounidense que operó en Chile y Perú hasta el 2013).
GIZ:	Agencia Alemana de Cooperación Técnica
ICE:	Instituto Costarricense de Electricidad
ICEL:	Instituto Colombiano de Energía Eléctrica
IIE:	Instituto de Investigaciones Eléctricas (México)
INE:	Instituto Nacional de Energía (Ecuador)
INECEL:	Instituto Ecuatoriano de Electrificación
INGEMMET:	Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (Perú)

INGEOMINAS:	Instituto Colombiano de Geología y Minería
IRENA:	International Renewable Energy Agency (Agencia Internacional de energías Renovables)
ISAGEN:	Empresa eléctrica colombiana
JBIC:	Japan Bank for International Cooperation (Banco de Cooperación Internacional del Japón)
JETRO:	Japan External Trade Organization (Organización de Comercio Exterior de Japón)
JICA:	Japan International Cooperation Agency (Agencia de Cooperación Japonesa)
JCF:	Japanese Trust Fund for Consultancy Services
JOGMEC:	Japan Oil Gas and Metal National Corporation (Corporación Japonesa de Petróleo, Gas y Metales)
KfW:	Kreditanstalt für Wiederaufbau (Banco gubernamental alemán de desarrollo)
kV:	kilo Voltios (1000 V)
kWh:	kilo Watts por hora (1000 W por hora)
MEER:	Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (Ecuador)
MEM:	Ministerio de Energía y Minas (Venezuela)
MINEM:	Ministerio de Energía y Minas (Perú)
MPPEE:	Ministerio del Poder Popular de Energía Eléctrica (Venezuela)
MRP:	Mighty River Power (Empresa geotérmica neozelandesa, con sucursales en Chile y Perú).
MT:	Magneto-telúrico (metodología de investigación geofísica)
NRECA:	National Rural Electric Cooperative Association (Asociación Nacional de Cooperativas Eléctricas Rurales de Estados Unidos de Norteamérica)
OIEA:	Organización Internacional de Energía Atómica
OLADE:	Organización Latinoamericana de Energía
ONU:	Organización de las Naciones Unidas
PNUD:	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
PPA:	Power Purchase Agreement (Contrato de compra-venta de energía)
PPP:	Public-Private Partnership (Asociación Público-Privado)
REN21:	Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (Red Internacional de Políticas de Energía Renovable)
SEGEMAR:	Servicio Geológico Minero Argentino
SERNAGEOMIN:	Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile)
SEV:	Sondeo Eléctrico Vertical (método de prospección geofísica)
SGC:	Servicio Geológico Colombiano
SIC:	Sistema Interconectado Central (Chile)
SING:	Sistema Interconectado del Norte Grande (Chile)

SYR:	Geociencias S.A. Empresa subsidiaria en Ecuador de la canadiense SYR & Whistler Consulting Group.
TDEM:	Time Domain Electromagnetics (metodología de investigación geofísica)
UNAM:	Universidad Nacional Autónoma de México
UNOCAL:	Union Oil Company of California
UPME:	Unidad de Planeación Minero Energética (Colombia)
USTDA:	U.S. Trade and Development Agency
US\$:	Dólar de los Estados Unidos de Norteamérica
UTE:	Unión Transitoria de Empresas
YPF:	Yacimientos Petrolíferos Fiscales (empresa petrolera estatal de Argentina)
YPFB:	Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos (empresa petrolera estatal de Bolivia)
West-Jec:	West Japan Engineering Consultants (firma consultora japonesa especializada en geotermia)

DOCUMENTOS
DE PROYECTO

DOCUMENTOS
DE PROYECTO



Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)
Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC)
www.cepal.org