

# EMPRENDIMIENTO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA EN COLOMBIA



Natacha C. Marzolf



# **EMPRENDIMIENTO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA EN COLOMBIA**

**Natacha C. Marzolf**

Banco Interamericano de Desarrollo  
Convenio ISAGEN – BID/JC. Colombia

**Catalogación en la fuente proporcionada por la  
Biblioteca Felipe Herrera del  
Banco Interamericano de Desarrollo**

Marzolf, Natacha C.

Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia / Natacha C. Marzolf.

p. cm. — (Monografía del BID ; 215)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Geothermal resources—Colombia. 2. Renewable energy sources—Colombia. I. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Energía. II. ISAGEN. III. Título. IV. Serie. IDB-MG-215

Códigos JEL: Q40, Q42

Palabras claves: Geotermia, Energía Geotérmica, Energía, Colombia, Energía alternativa, Energía renovable, Renovables, Geología, Geofísica, Gases de efecto invernadero, Calentamiento Global.

Equipo del BID compuesto por:

Natacha C. Marzolf

Pilar Rodriguez

Alberto Levy Ferre

Haydemar Cova

Jose Ramon Gomez

Las opiniones expresadas en esta publicación son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.

Se prohíbe el uso comercial o personal no autorizado de los documentos del Banco, y tal podría castigarse de conformidad con las políticas del Banco y/o las legislaciones aplicables.

Copyright © 2014 Banco Interamericano de Desarrollo. Todos los derechos reservados; este documento puede reproducirse libremente para fines no comerciales.

**ISAGEN S.A. ESP.**

Dirección de Investigación y Desarrollo

Carrera 30 N° 10C – 280 Transversal Inferior, Medellín

Teléfono (574) 325 69 30, fax: (574) 448 88 87

Correo electrónico: [investigacionydesarrollo@isagen.com.co](mailto:investigacionydesarrollo@isagen.com.co)

Foto Portada: Fuente: Página web del Servicio Geológico Colombiano (antes INGEOMINAS) Diciembre 14 de 2007.

“ISAGEN S.A. E.S.P. y el BID participan en la publicación de este Documento Técnico bajo el entendido de que se trata de una obra con fines académicos y sin ánimo de lucro. Por tanto, de conformidad con el Artículo 32 de la Ley 23 de 1982, entiende que la cita o reproducción parcial de obras literarias, artísticas o de cualquier otra naturaleza, pertenecientes a otras personas, se hace con fines de ilustración y por tanto, en ningún caso, supone un aprovechamiento de las mismas que dé lugar al pago de cualquier erogación a favor de sus autores.”

# TABLA DE CONTENIDO



<b>PRÓLOGO</b>	<b>V</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2. ANTECEDENTES</b>	<b>3</b>
<b>3. NATURALEZA Y ORIGEN DEL RECURSO GEOTÉRMICO</b>	<b>7</b>
<b>3.1 Origen del recurso geotérmico</b>	<b>9</b>
<b>3.2 Sistemas geotérmicos</b>	<b>11</b>
<b>3.3 Tecnologías de generación de energía eléctrica</b>	<b>15</b>
<b>3.4 Producción y conducción de vapor</b>	<b>17</b>
<b>3.5 Características ambientales de la tecnología</b>	<b>18</b>
3.5.1 <i>Clasificación del recurso</i>	18
3.5.2 <i>Emisiones atmosféricas</i>	20
3.5.3 <i>Vertimientos líquidos y sólidos</i>	22
3.5.4 <i>Uso del terreno y ruido</i>	23
<b>4. ESTADO Y PERSPECTIVAS DE LA GEOTERMIA</b>	<b>25</b>
<b>4.1 Capacidad instalada en el mundo</b>	<b>25</b>
<b>4.2 Perspectivas de crecimiento en el mundo</b>	<b>28</b>
<b>4.3 Desarrollo de la geotermia en Colombia</b>	<b>31</b>
4.3.1 <i>Logros del proyecto</i>	34
4.3.2 <i>Lecciones aprendidas y retos para el desarrollo de la geotermia</i>	36
<b>5. FASES DE DESARROLLO DE UN PROYECTO GEOTÉRMICO</b>	<b>39</b>
<b>5.1 Fase 1. Reconocimiento</b>	<b>41</b>
<b>5.2 Fase 2. Prefactibilidad</b>	<b>42</b>

5.2.1	<i>Restitución cartográfica</i>	42
5.2.2	<i>Geología</i>	42
5.2.3	<i>Geofísica</i>	43
<b>5.3</b>	<b>Fase 3. Factibilidad</b>	<b>56</b>
5.3.1	<i>Perforaciones exploratorias</i>	56
5.3.2	<i>Evaluación del yacimiento</i>	59
5.3.3	<i>Evaluación de viabilidad técnica y económica</i>	59
5.3.4	<i>Diseño de la planta y planeación del desarrollo del campo</i>	60
<b>5.4</b>	<b>Fase 4. Construcción y operación</b>	<b>62</b>
<b>6.</b>	<b>PERMISOS, CONCESIONES, LICENCIAS Y ESTUDIOS AMBIENTALES</b>	<b>63</b>
<b>6.1</b>	<b>Permiso de estudio</b>	<b>65</b>
<b>6.2</b>	<b>Concesiones</b>	<b>66</b>
<b>6.3</b>	<b>Licencia ambiental</b>	<b>67</b>
<b>6.4</b>	<b>Estudios ambientales</b>	<b>70</b>
6.4.1	<i>Diagnóstico Ambiental de Alternativas (DAA)</i>	70
6.4.2	<i>Estudio de impacto ambiental (EIA)</i>	71
<b>6.5</b>	<b>Otras normas de interés</b>	<b>73</b>
<b>7.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>75</b>

# PRÓLOGO



Colombia es un país extraordinariamente rico en recursos energéticos, con un amplio predominio de la hidroelectricidad en su aprovechamiento. La matriz energética actual ha permitido que la demanda de electricidad del país haya podido atenderse en el pasado reciente, utilizando un 80% de generación basada en hidroelectricidad y el 20% restante distribuido en otras fuentes como el gas natural y el carbón principalmente.

Estas buenas noticias se ven de alguna manera comprometidas por un fenómeno global; el Cambio Climático, que día a día nos permite evidenciar sus efectos sobre el planeta y de manera particular en zonas ambientalmente sensibles como son los glaciares y nevados.

El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) comprometido con la causa de la defensa racional del medio ambiente, propugnando por un desarrollo sostenible que le permita a los países en desarrollo aprovechar de una manera óptima sus recursos naturales, potenciando el crecimiento y la creación de valor para todos los grupos de interés de la sociedad, acogió con entusiasmo la propuesta formulada por ISAGEN S.A. E.S.P. (ISAGEN), empresa colombiana de servicios públicos mixta, de llevar adelante el desarrollo y aprovechamiento del recurso geotérmico disponible en Colombia.

Es por esta razón que el BID, con recursos del Fondo de Consultoría Japonés (JCF) y el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF) impulsó la iniciativa de ISAGEN de desarrollar el potencial geotérmico, con el soporte técnico del consorcio Nippon Koei – Geothermal – Integral. Durante este trabajo, se realizó la integración de la información obtenida en los estudios técnicos de superficie realizados previamente por ISAGEN y se desarrolló el modelo geotérmico conceptual conducente a la selección de un área de interés para exploración y uso de la geotermia en la zona de influencia del Macizo Volcánico del Ruiz en Colombia.

Los trabajos realizados por ISAGEN han contado con el apoyo de un grupo interdisciplinario conformado por profesionales y expertos de la Universidad Nacional de Colombia, el Servicio Geológico Colombiano (antes Ingeominas), el Centro Internacional de Física, la Universidad Nacional Autónoma de México y la cofinanciación de USTDA y COLCIENCIAS.

El BID pone a disposición de los lectores interesados, la presente monografía, en la cual se condensan las experiencias y lecciones aprendidas en el desarrollo de este proyecto y en especial de la cooperación técnica Inversiones Catalizadoras para Energía Geotérmica en Colombia.







# INTRODUCCIÓN

# 1

COLOMBIA SUPLE SUS NECESIDADES DE ENERGÍA ELÉCTRICA, PRINCIPALMENTE, CON generación hidroeléctrica y termoeléctrica (66,92% y 32,75% de la capacidad instalada respectivamente), pero frente al marco coyuntural actual, relacionado con la problemática ambiental global y los efectos del cambio climático, el Estado Colombiano ha priorizado en sus políticas, la promoción del uso eficiente de la energía, el desarrollo de fuentes no convencionales de energía, la mitigación del cambio climático y la reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), mediante la Ley de Uso Racional de Energía (Ley 697 de 2001; el Decreto 3683 de 2003; el Plan Indicativo (2010–2015) para desarrollar el Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y demás formas de energía no convencionales; el Plan Energético Nacional (PEN) 2010–2030; el Plan Energético Nacional, Estrategia Energética Integral, Visión 2003–2020 y la Ley 1450 de 2011 (Plan de Desarrollo, artículo 105), normas que entre otros tienen los siguientes objetivos:

- Ampliar y garantizar el suministro de energía con base en precios económicos, y con la confiabilidad y calidad adecuadas;
- Impulsar el desarrollo regional y local;
- Incorporar nuevas fuentes y tecnologías de generación de energía;
- Promocionar el uso de fuentes no convencionales de energía.

En este sentido se hace necesario poner en práctica dichas políticas, mediante el desarrollo de las fuentes no convencionales de energía, aprovechar el alto potencial de otros recursos energéticos, diferentes a la hidroelectricidad y como complemento a la misma.

En cuanto al recurso geotérmico, Colombia cuenta con una posición geográfica privilegiada y una geología favorable, dado que parte del territorio se encuentra ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, zona donde el gradiente de temperatura natural del subsuelo, cerca de la superficie, es anómalamente alto y se manifiesta con la actividad volcánica actual.

En Colombia se evidencia este potencial geotérmico en zonas adyacentes a los volcanes Chiles, Cerro Negro, Cumbal, Azufral, Galeras, Doña Juana, Sotará, Puracé, Nevado del Huila, Nevado del Ruiz y Nevado del Tolima. La historia eruptiva reciente y la presencia de fuentes de aguas termales, fumarolas y zonas de alteración hidrotermal superficial, podrían ser evidencia de la existencia de un recurso geotérmico con características adecuadas para su uso con fines de generación de energía eléctrica.

En este contexto el BID ha considerado de la mayor importancia, apoyar el desarrollo de esta fuente energética con un gran potencial de desarrollo en países como Colombia, con el objetivo de que el país pueda diversificar su canasta energética y desarrollar fuentes alternas de generación de energía más limpia, que contribuyan a la reducción de las emisiones de Gases de Efecto de Invernadero (GEI), así como su adaptación al cambio climático.

Con este documento el BID e ISAGEN quieren compartir con la comunidad las experiencias y aprendizajes obtenidos para el desarrollo de las primeras fases de un proyecto geotérmico en Colombia, el cual ha sido ejecutado por ISAGEN con el apoyo del BID y otras entidades que han participado activamente en el mismo, con el fin de que esta experiencia pueda aportar elementos de referencia para otros emprendimientos similares.

## ANTECEDENTES

# 2

ISAGEN S.A. ESP., COMO PARTE DE SU POLÍTICA DE RESPONSABILIDAD EMPRESARIAL Y en apoyo a las Políticas Nacionales para el desarrollo de las Fuentes No Convencionales de Energía, promueve y financia la investigación para el desarrollo y el aprovechamiento de la energía geotérmica. La Empresa en desarrollo de su objeto social de generación y comercialización de energía, cuenta con más de con más de 40 años de experiencia en el desarrollo, construcción y operación de proyectos de generación de energía eléctrica, durante los cuales ha aplicado criterios de desarrollo sostenible.

Actualmente, la Empresa se encuentra realizando los estudios requeridos para el desarrollo de dos (2) proyectos geotérmicos en áreas con un alto potencial geotérmico, localizados en el Macizo Volcánico del Ruíz (MVR) y en la zona de influencia de los volcanes Tufiño, Chiles y Cerro Negro, en la frontera con el Ecuador.


En cuanto al desarrollo del recurso en la región, este es considerado incipiente, aún a pesar de los diferentes estudios realizados desde finales de la década de 1970 para el reconocimiento del potencial geotérmico, entre los cuales citamos los siguientes:

- Estudio de reconocimiento de campos geotérmicos existentes entre Colombia y Ecuador. OLADE, AQUATER, BRGM y GEOTÉRMICA ITALIANA. 1979 a 1982.
- Estudios de prefactibilidad de desarrollo geotérmico en las áreas de Chiles – Tufiño – Cerro Negro INECEL – OLADE 1982; OLADE – ICEL. 1986–1987.
- Estudios de prefactibilidad de desarrollo geotérmico en las áreas del Complejo Volcánico Nevado del Ruíz. CHEC 1983; GEOCONSUL 1992; GESA 1997.
- Mapa Geotérmico de Colombia. INGEOMINAS 2000 (Actualmente Servicio Geológico Colombiano). Mapa Geotérmico de Colombia. INGEOMINAS – ANH. 2008.
- Estudios de investigación de los sistemas geotermiales de las áreas de los Volcanes Azufra y Cumbal. INGEOMINAS 1998–1999, 2008–2009; INGEOMINAS – UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA 2006.
- Estudios de investigación de los sistemas geotermiales de las áreas de Paipa e Iza. INGEOMINAS 2005, 2008–2009.

Por su parte, ISAGEN ha realizado una serie de estudios sobre energías renovables y fuentes no convencionales de energía con el apoyo de diferentes empresas y entidades, con el propósito de avanzar en su desarrollo y potencial aprovechamiento. Para lograr este propósito,

ISAGEN ha contado con el apoyo de entidades y organismos nacionales e internacionales como el Departamento Administrativo de Ciencia Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS), la Universidad Nacional de Colombia (UNAL), el Servicio Geológico Colombiano (SGC, antes INGEOMINAS), la Agencia para el Comercio y el Desarrollo de los Estados Unidos de América (USTDA), el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), el Centro Internacional de Física (CIF), la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la Empresa Pública Estratégica, Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC EP). Entre estos estudios se encuentran los siguientes:

- Nuevas tecnologías de generación de energía. ISAGEN. 1997.
- Nuevas tecnologías de generación de energía, actualización y viabilidad en Colombia. ISAGEN – UNAL. 2004.
- Estudio de generación de energía utilizando las mareas, oleajes y corrientes marinas de la región costera colombiana. ISAGEN, COLCIENCIAS, PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA,. 2006.
- Regulación para incentivar las energías alternas y la generación distribuida en Colombia. ISAGEN, COLCIENCIAS, UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. 2008.
- Factibilidad básica para el desarrollo de un proyecto geotérmico en Colombia. ISAGEN – INGEOMINAS – USTDA. 2008.
- Programa estratégico para el modelamiento del sistema hidrotermal magmático para el Proyecto Geotérmico Macizo Volcánico del Ruiz. Los estudios incluyen la toma de fotografías aéreas y restitución cartográfica, levantamiento de geología de detalle, estudios de geoquímica, hidrogeología, geofísica (gravimetría y magnetometría) y perforación de pozos de gradiente térmico. ISAGEN, UNAL, INGEOMINAS y COLCIENCIAS. 2010–2012.
- Modelación de la estructura resistiva del subsuelo por sondeos magnetotéluricos para el Proyecto Geotérmico Macizo Volcánico del Ruiz. Capacitación y entrenamiento en la aplicación de la tecnología de magnetotélurica. ISAGEN, INGEOMINAS, CIF, UNAM y COLCIENCIAS. 2010–2012).
- Estudios de prefactibilidad sobre recursos geotérmicos en dos áreas seleccionadas ubicadas en el Macizo Volcánico del Ruiz. Los estudios incluyen la elaboración del modelo geotérmico conceptual, selección de sitios para perforación exploratoria, diseño de infraestructura (pozos, plataformas y vías de acceso) y estudios ambientales para el desarrollo de la fase de factibilidad del Campo Geotérmico del Macizo Volcánico del Ruiz. Colombia (ISAGEN, BID/Fondo Japonés. Consorcio NIPPON KOEI – GEOTHERMAL E - INTEGRAL. 2011–2013.
- Inversiones catalizadoras para energía geotérmica. Complementación del modelo resistivo del subsuelo, asesoría y acompañamiento para la etapa de perforación exploratoria. ISAGEN, BID/GEF. 2011–2014. (En ejecución).

- 
- Estudio de prefactibilidad para el desarrollo del Proyecto Geotérmico Binacional Tufiño – Chiles – Cerro Negro. Los estudios incluyen la toma de fotografías aéreas, restitución cartográfica, estudios de geología de detalle, geofísica, geoquímica, hidrogeología, perforación de pozos de gradiente geotérmico y estudios ambientales para el desarrollo de la fase de factibilidad. ISAGEN, CELEC EP. 2011–2014. (En Ejecución).

Dada la importancia de dar a conocer la experiencia de Colombia, el BID e ISAGEN a través de la cooperación técnica recibida del Fondo Japonés (JCF) y el Fondo Ambiental Mundial para el Medio Ambiente (FNAM/GEF) han compilado en este documento los aspectos que consideran de mayor relevancia para el desarrollo de la tecnología y en particular algunos avances del proyecto de generación de energía geotérmica desarrollado por ISAGEN en la zona de influencia del MVR.



# NATURALEZA Y ORIGEN DEL RECURSO GEOTÉRMICO

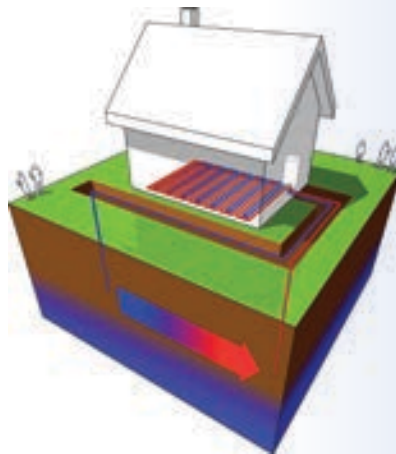
## 3

LA GEOTERMIA ES EL CALOR QUE SE PRODUCE EN EL INTERIOR DE LA TIERRA Y ES TRANSFERIDO a la superficie. En general los lugares más apropiados para el aprovechamiento de este calor están cerca de los volcanes, en cuyo interior se localizan rocas a altas temperaturas, que calientan el agua que se infiltra en el subsuelo. En la superficie la geotermia se manifiesta en los manantiales termales que descargan agua caliente y vapor. Este recurso se puede aprovechar para:

- Baños medicinales
- Calefacción
- Turismo y recreación
- Agricultura y piscicultura.
- Actividades industriales.
- Generación de energía eléctrica

En 1904 se inició el uso de los fluidos geotérmicos como fuente de energía. En ese período se instaló en Italia una industria química en la zona conocida como Larderello, para extraer el ácido bórico contenido en las aguas calientes que se extraían de pozos perforados con ese fin. Posteriormente en este sitio se instaló una planta de generación de energía eléctrica de 250 kW, la cual entró en operación en 1913. Actualmente la potencia instalada en Larderello es de 390 MW<sup>2</sup>.

**Figura 1** Calefacción con radiadores de piso y pared con fluidos geotérmicos<sup>1</sup>



Durante los últimos 30 años el uso de la geotermia para generación de energía se consolidó como una industria madura y competitiva. Esta tecnología ha evolucionado con base en los continuos mejoramientos en el diseño de los equipos de transformación del calor en energía y

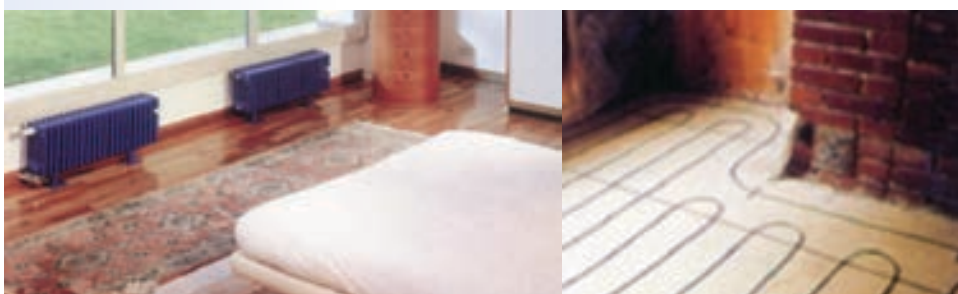
<sup>1</sup> Direct Heat Utilization of Geothermal Resources Worldwide 2005; Oregon Institute of Technology; John Lund et al; 2005. <http://geoheat.oit.edu/pdf/directht.pdf>.

<sup>2</sup> What is geothermal energy?. Dickson et al, Fanelli; Istituto di Geoscienze o Georisorse; 2004. [http://www.geothermal-energy.org/314,what\\_is\\_geothermal\\_energy.htm](http://www.geothermal-energy.org/314,what_is_geothermal_energy.htm).

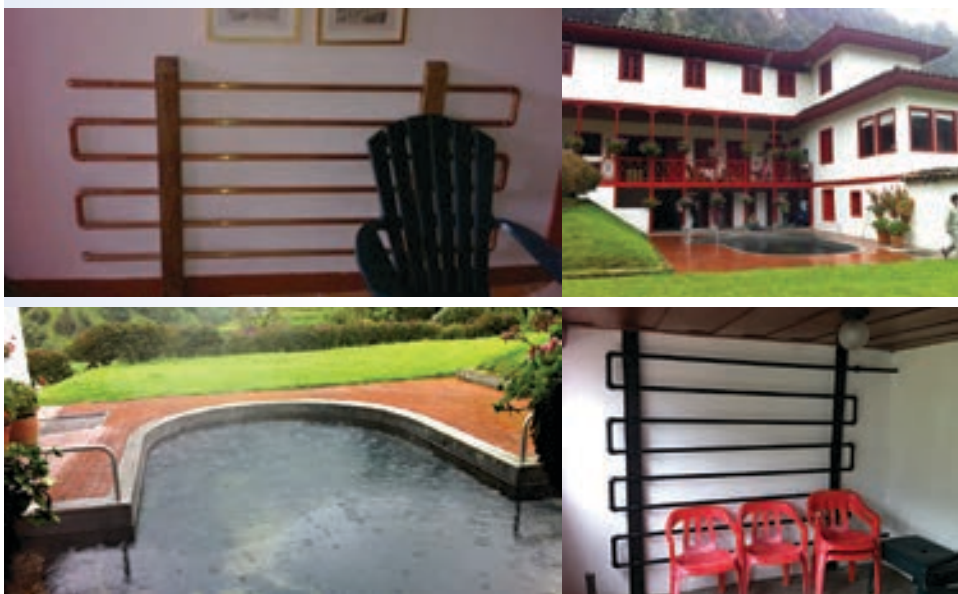


en la transferencia de la tecnología usada para la exploración de petróleo y gas. Países como Japón, Islandia, Nueva Zelanda, El Salvador, Costa Rica, Estados Unidos y México hacen un uso intensivo de la geotermia.

**Figura 2 Calefacción con radiadores de piso y pared con fluidos geotérmicos<sup>3</sup>**



**Figura 3 Uso de geotermia para calefacción en la Hacienda La Quinta. Macizo Volcánico del Ruiz.<sup>4</sup>**



<sup>3</sup> Hua xin district – 200.000 m<sup>2</sup>. Tianjin. En Geothermal Energy in the World, with special reference to Central America. Ingvar Friedleifsson, Ingimar Harladason. Short Course on Geothermal Drilling, Resources, Development and Power Plants. Organized by UNU. GTP and LaGeo in Salvador, January 16–22, 2022. United Nations University, Geothermal Training Program. Reykjavik. Iceland. [www.unugtp.is](http://www.unugtp.is) [www.unugtp.is](http://www.unugtp.is).

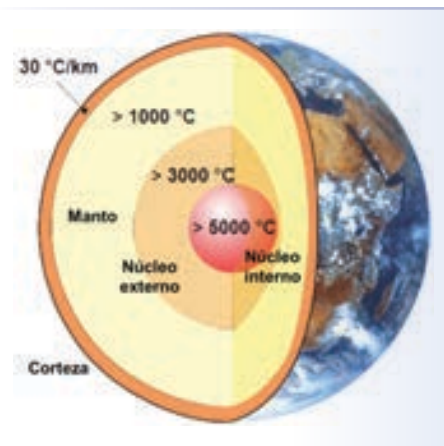
<sup>4</sup> Hacienda La Quinta. Proyecto Geotérmico Macizo Volcánico del Ruiz. ISAGEN 2011.

### 3.1. Origen del recurso geotérmico

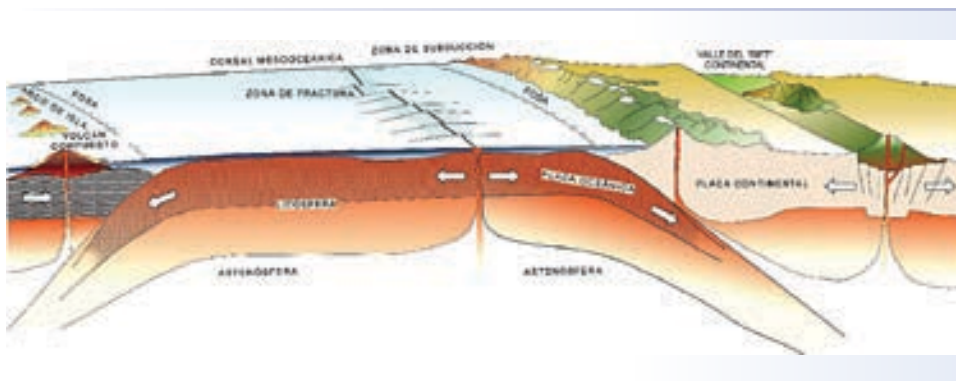
La tierra está compuesta por una secuencia de capas cuyo centro es el núcleo interno, el cual está compuesto por metales pesados y sólidos de alta densidad. Luego se encuentra el núcleo externo que es semisólido y está conformado por elementos menos pesados. El manto es una masa de sílice fluida que recubre el núcleo externo. La rotación del núcleo y la circulación de la roca fundida en el manto son responsables de la formación del campo magnético de la tierra.

Por su parte, la corteza terrestre, más sólida y liviana, flota sobre el manto, desplazándose sobre él, lo cual produce un fenómeno conocido como deriva continental, causante del choque entre las placas continentales y las placas marinas. Dicha colisión produce la subducción, un fenómeno que hace deslizar la placa oceánica por debajo de la capa continental. En los sitios cercanos al contacto entre las placas continentales y marinas se genera una alta actividad volcánica por el ascenso del magma líquido, incrementando los movimientos telúricos y originando el levantamiento de las cordilleras.

**Figura 4** Esquema de la estructura de la tierra<sup>5</sup>



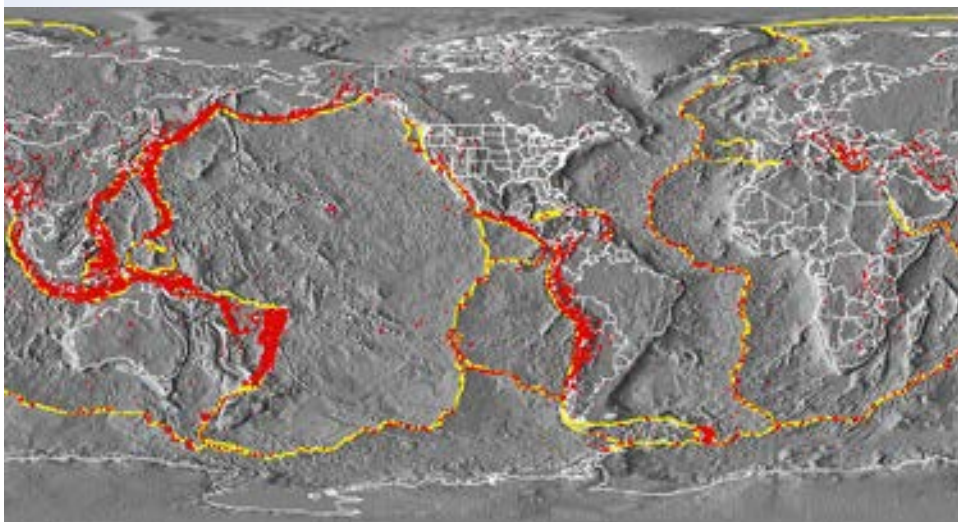
**Figura 5** Sección transversal esquemática del proceso de tectónica de placas<sup>6</sup>



<sup>5</sup> Ver referencia 2.

<sup>6</sup> Ver referencia 2.

**Figura 6 Cinturón de fuego del Pacífico<sup>7</sup>**



La mayor expresión de la actividad volcánica, producida por el choque y subducción entre las placas tectónicas, se localiza en lo que se denomina El Cinturón de Fuego del Pacífico, el cual rodea la línea de la costa occidental del continente americano. Estas zonas presentan una elevada actividad sísmica y volcánica, con un alto potencial geotérmico.

El gradiente geotérmico o aumento de la temperatura de la tierra con la profundidad es una variable indicativa del potencial geotérmico de un sitio. Un valor normal de gradiente térmico corresponde a un aumento de entre 25 y 30 °C/km.

En algunas regiones, especialmente en aquellas donde se presentan volcanes, el gradiente geotérmico es superior al normal. Comúnmente en estas zonas afloran manantiales de aguas termales que constituyen una evidencia de la presencia de rocas calientes, masas magmáticas o gases volcánicos en ascenso o cerca de la superficie y que provienen del calor del interior de la tierra. Las regiones con estas características podrían ser promisorias para desarrollos geotérmicos y especialmente, para generación de energía eléctrica.

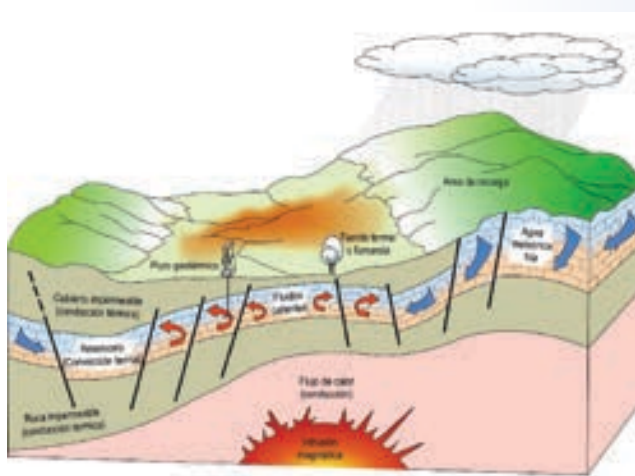
<sup>7</sup> Classification of Geothermal Resources An Engineering Approach; K.C. Lee; Proceedings Twenty First Workshop on Geothermal Reservoir Engineering; Stanford University; 1996. <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/1996/Lee.pdf>.

## 3.2. Sistemas geotérmicos

Se denomina sistema geotérmico a un conjunto de elementos naturales que se pueden presentar en una misma área o campo geotérmico y de la cual es posible extraer fluidos geotérmicos con diferentes fines. Los componentes principales de este tipo de sistemas son los siguientes:

- a. **Fuente de calor:** puede ser; una roca caliente que ha incrementado su temperatura por contacto con un cuerpo volcánico intrusivo; una cámara magmática o gases calientes de origen magmático. Generalmente la fuente de calor presenta temperaturas mayores a los 600 °C. Estas fuentes se pueden encontrar a diferentes profundidades, mayores a dos kilómetros.
- b. **Reservorio geotérmico:** formación de rocas permeables, donde circula el fluido geotérmico a profundidades económicamente explotables. Conocido también como yacimiento geotérmico.
- c. **Sistema de suministro de agua:** sistema de fallas o diaclasas en las rocas que permiten la recarga del reservorio geotérmico con el agua que se infiltra en el subsuelo. Este flujo reemplaza los fluidos que salen del reservorio en forma de manantiales termales o aquellos que son extraídos a través de pozos.
- d. **Capa sello:** estrato impermeable, generalmente compuesto por arcillas (esmectita o montmorillonita) producto de la alteración de las rocas por alta temperatura, que cubre el reservorio, lo contiene y evita la pérdida de agua y vapor.

**Figura 7** Esquema de un sistema geotérmico idea<sup>8</sup>



<sup>8</sup> Ver referencia 2.

- e. **Fluido geotérmico:** se denomina así al agua, en su fase líquida, de vapor o en combinación, que se encuentra en el reservorio geotérmico y que puede aflorar a la superficie de manera natural mediante manantiales de aguas termales o pozos geotérmicos. Estos fluidos a menudo contienen sustancias químicas disueltas como cloruros (Cl), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), sulfatos (SO<sub>4</sub>) y sales minerales.

Los sistemas geotérmicos se pueden clasificar de acuerdo con su entalpía (capacidad de absorber o ceder energía termodinámica), representada en la temperatura de los fluidos geotérmicos, como sigue, según diferentes autores:

**Tabla 1 Clasificación del recurso o fluidos geotérmicos<sup>9</sup>**

Clase de sistema	Muffler & Cataldi (1978)	Hochstein (1990)	Benderitter & Cormy(1990)	Haene. Rybach & Stegena (1998)
Baja entalpía. (Agua termal)	< 90 °C	< 125 °C	< 100 °C	< 150 °C
Media entalpía. (Vapor y agua)	90° a 150 °C	125 a 225 °C	100 a 200 °C	NA
Alta entalpía. (Dominado por vapor seco)	> 150 °C	> 225 °C	> 200 °C	> 150

La transferencia de calor en los sistemas geotérmicos es controlada por la convección o el movimiento de los fluidos geotérmicos. El movimiento de los fluidos tiene lugar debido al calentamiento y a la consecuente expansión del agua y el vapor. Los fluidos son calentados por la roca caliente, el magma o gases volcánicos, en la base del sistema de circulación; y por su menor densidad tienden a ascender y a ser reemplazados por fluidos fríos de mayor densidad que provienen de los límites externos del sistema.

La convección, por su naturaleza, tiende a incrementar las temperaturas de la parte superior del sistema, mientras que en la parte inferior las disminuye.

La estructura, geometría y funcionamiento de un sistema geotérmico parece bastante simple, sin embargo entender y representar fielmente un sistema geotérmico real, a partir de sus modelos, no es fácil. Para ello se requiere la recolección en campo y la compilación y análisis en oficina de información de varias disciplinas como: fotogrametría, cartografía, geología, geofísica, geoquímica e hidrogeología, entre otras, además de una vasta experiencia para

<sup>9</sup> Ver referencia 7.

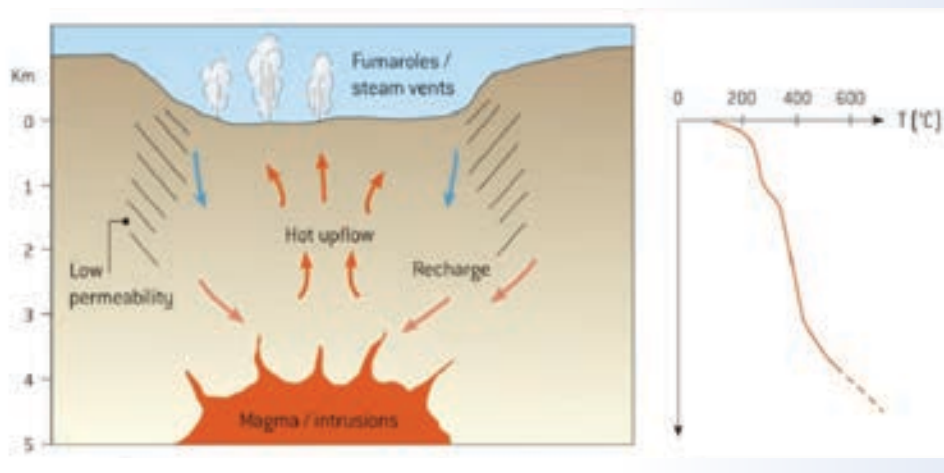


poder interpretar la información técnica y abstraer de ella la geometría, localización y funcionamiento del sistema hidrotérmico, todo lo cual es representado en un Modelo Geotérmico Conceptual.

**Figura 8** Esquema de la circulación del agua en un sistema controlado por una falla<sup>10</sup>



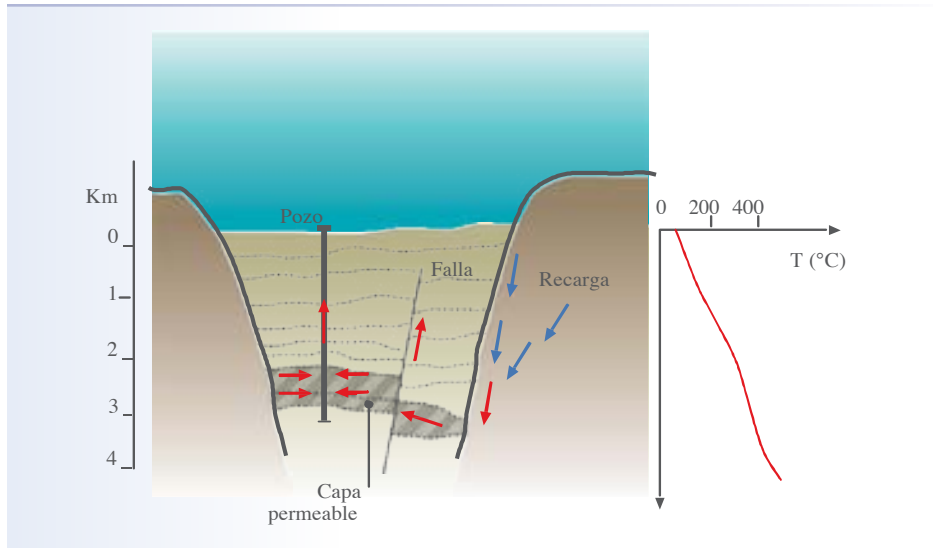
**Figura 9** Esquema de un sistema geotérmico volcánico<sup>11</sup>



<sup>10</sup> Geothermal systems in global perspective; Kristján Saemundsson et al, "Short Course on Geothermal Drilling, Resource Development and Power Plants "UNU-GTP and LaGeo, El Salvador, January 16–22, 2011. <http://www.os.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-12-02.pdf>.

<sup>11</sup> Ver referencia 10.

**Figura 10** Esquema de un sistema geotérmico de una cuenca sedimentaria<sup>12</sup>



Los sistemas geotérmicos se encuentran en la naturaleza en una variedad de combinaciones de características geológicas, físicas y químicas específicas, dando así origen a diferentes tipos de sistemas geotérmicos.

El corazón de un sistema geotérmico lo constituye la fuente de calor. Si las condiciones son favorables, los demás componentes pueden ser adecuados artificialmente. En algunos casos, si se encontrara roca caliente seca, es posible inyectar agua superficial y obtener vapor o agua caliente.

Los fluidos geotérmicos usados para la generación de energía pueden ser devueltos al sistema de roca caliente o a un reservorio geotérmico, mediante pozos de reinyección, una vez que los fluidos se han utilizado y hayan perdido calor y presión; de esta manera se asegura la recarga del reservorio.

Otra forma de mantener campos geotérmicos viejos o agotados, es la recarga artificial mediante pozos de inyección. Así se hizo cuando, debido a una falta de fluidos, en 1998 la producción del campo geotérmico de los Geysers, en California (EE.UU), empezó a declinar dramáticamente. Allí se inició el transporte y reinyección de 0,48 m<sup>3</sup>/segundo de aguas residuales tratadas, las cuales fueron transportadas desde una distancia de 66 kilómetros, con lo que se logró reactivar la mayoría de plantas de generación de energía eléctrica del campo.

<sup>12</sup> Ver referencia 10.



### 3.3. Tecnologías de generación de energía eléctrica

Los fluidos geotérmicos se pueden utilizar para generar energía eléctrica mediante la utilización de motores o turbinas a vapor en un ciclo termodinámico denominado Rankine, el cual se explica por la capacidad del vapor de expandirse y contraerse por el cambio de temperatura y su condensación. La inyección del vapor en la turbina ejerce fuerza sobre sus álabes o sobre los pistones de un motor, produciendo el movimiento de su eje para transmitir fuerza y movimiento a un generador eléctrico.

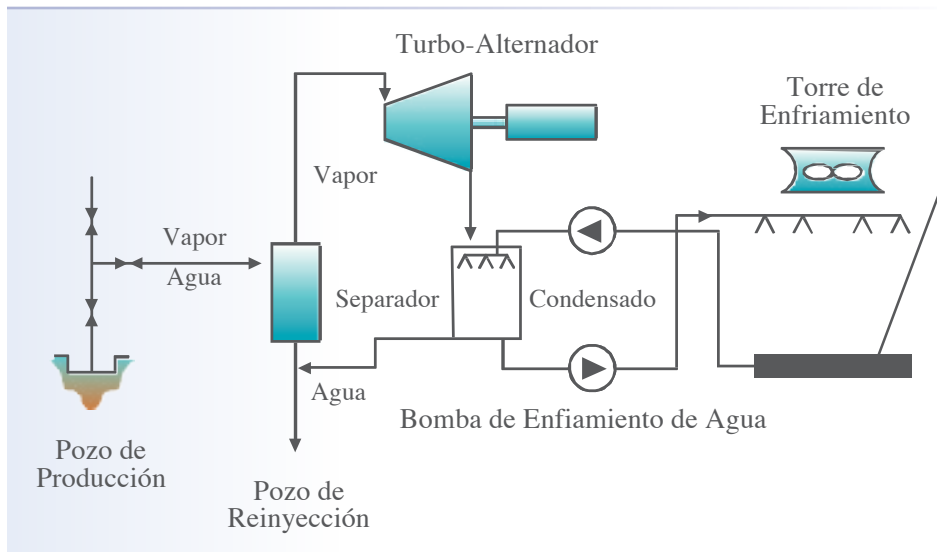
Actualmente se genera energía eléctrica utilizando la geotermia, mediante las siguientes tecnologías:

- a. **Flash:** también denominada abierta o de vapor directo. Esta tecnología se utiliza cuando se tienen fluidos geotérmicos con temperaturas superiores a los 200 °C en planta. Los fluidos geotérmicos pasan por un separador de vapor y agua, el vapor se inyecta a una turbina que a su vez mueve el generador eléctrico, pasando luego a un condensador. El fluido geotérmico que ha cedido el calor retorna al reservorio mediante pozos de reinyección.
- b. **Binaria:** también se conoce como de ciclo cerrado. Esta tecnología se utiliza cuando se tienen fluidos geotérmicos con temperaturas inferiores a los 200 °C en planta. En la tecnología binaria, los fluidos geotérmicos calientan un compuesto orgánico por medio de un intercambiador de calor. Se usan compuestos orgánicos como n-pentano o amoníaco, entre otros, que tienen bajo punto de ebullición y alta presión de vapor a bajas temperaturas. El vapor del compuesto orgánico es inyectado a una turbina que, a su vez, mueve un generador eléctrico, pasando luego a un condensador y retornando al ciclo. El fluido geotérmico que ha cedido el calor retorna al reservorio mediante pozos de reinyección.

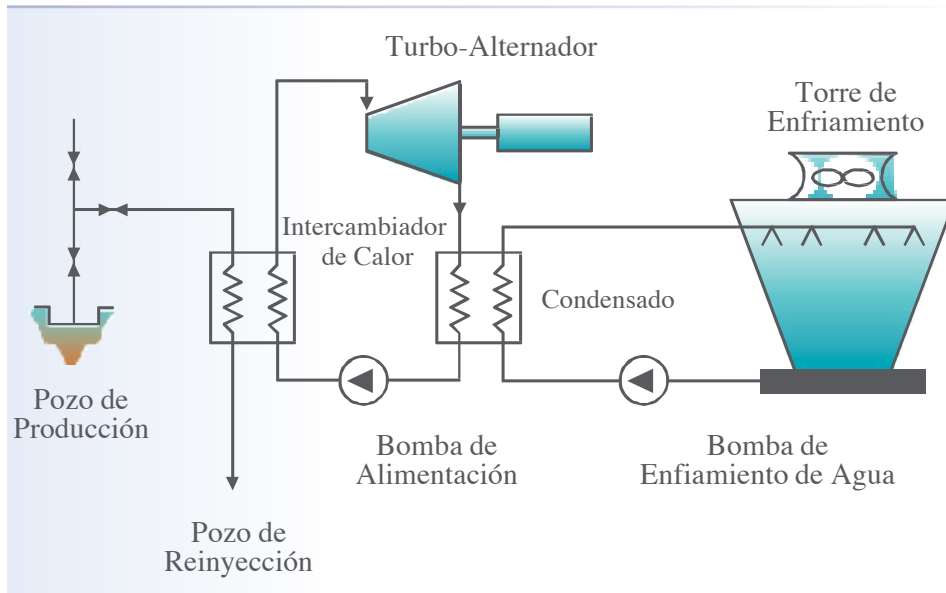
Dependiendo de la presión y la temperatura de los fluidos geotérmicos se pueden usar diferentes tipos de turbinas de vapor, que se diferencian por su capacidad y eficiencia, entre estas se pueden encontrar:

- a. **Turbinas de contrapresión:** la salida del vapor de la turbina se encuentra a una presión superior a la atmosférica, el vapor es más fácil de transportar y puede ser utilizado en otros procesos.
- b. **Turbinas de condensación:** el vapor, a la salida de la turbina, entra a un intercambiador de calor donde se condensa, generando vacío y un empuje adicional en la turbina. El vapor condensado es transportado para su reinyección al campo geotérmico. Los fluidos geotérmicos una vez usados para generación de energía pueden ser utilizados

**Figura 11** Esquema general de una planta tipo flash<sup>13</sup>



**Figura 12** Esquema general de una planta tipo binaria<sup>14</sup>



<sup>13</sup> Ver referencia 2.

<sup>14</sup> Ver referencia 2.

**Figura 13** Turbina de vapor para geotermia en mantenimiento<sup>15</sup>



como fuente de calor en agricultura, piscicultura, para su distribución como un servicio público de calefacción o con fines turísticos.

- c. **Turbinas de una o varias etapas:** de acuerdo con la temperatura y presión de los fluidos geotérmicos se pueden instalar turbinas de una etapa, en las que el vapor que sale de la turbina va al condensador y de allí al pozo de reinyección. En las turbinas de varias etapas él vapor sale de una sección de la turbina que opera a alta presión y entra a otra que trabaja con vapor de menor presión, y así sucesivamente, hasta que el vapor pierde su capacidad de trabajo y es descargado en el condensador para su reinyección al campo geotérmico.

### 3.4. Producción y conducción de vapor

Los fluidos geotérmicos extraídos de un pozo pueden ser transportados por tuberías aisladas térmicamente, a distancias de varios kilómetros, dependiendo de la temperatura y presión del fluido. Los costos de transporte del fluido aumentan considerablemente con la distancia, el fluido pierde presión y temperatura, por tanto lo ideal es usarlo en boca de pozo.

Existen dos alternativas para la conducción y uso del vapor. La primera consiste en aprovechar el vapor para generación de energía en boca de pozo, con unidades de cerca de 5 o 10 MW de capacidad. La segunda, es transportar los fluidos geotérmicos de varios pozos, hasta un mismo punto y allí instalar una planta de generación de energía de mayor capacidad.

<sup>15</sup> Turbina para geotermia en mantenimiento Planta de Berlín. LaGeo, El Salvador, “Short Course on Geothermal Drilling, Resource Development and Power Plants” UNU-GTP and LaGeo, El Salvador, January 16–22, 2011. Foto ISAGEN 2011.

**Figura 14** Líneas de conducción y cabezas de pozo en campo geotérmico de El Salvador<sup>16</sup>



La decisión del uso del vapor en boca de pozo o su transporte hasta una planta de generación de una capacidad mayor, depende de las características de los fluidos geotérmicos, la capacidad de producción del campo, la distancia entre los distintos pozos, los costos inherentes a las inversiones requeridas para el transporte de los fluidos, los costos de la planta de generación y los costos de producción.

### 3.5. Características ambientales de la tecnología


Existen diferentes percepciones ambientales y algunos temores sobre los efectos de esta tecnología sobre el ambiente y la comunidad. Algunas de estas percepciones podrían ser erradas y se basan en el desconocimiento de la tecnología.

A este respecto, la Asociación de Energía Geotérmica (GEA) realizó en el año 2004 una intensiva labor de recopilación de información sobre el desarrollo de plantas de geotermia para generación de energía y sobre plantas en operación, cuyo resultado fue la presentación del documento “*A Guide to Geothermal Energy and the Environment*” escrito por Alyssa Kagel, Diana Bates, & Karl Gawell, actualizado en 2007, y sobre el cual nos basaremos para presentar las características ambientales de la tecnología.

#### 3.5.1 Clasificación del recurso

La energía geotérmica es considerada en todo el mundo como una forma de energía limpia y renovable. Se estima que el flujo de calor del interior de la tierra es cercano a los 42 millones

<sup>16</sup> Líneas de conducción y cabezas de pozo en campo geotérmico. Planta de Berlín. LaGeo, El Salvador, “Short Course on Geothermal Drilling, Resource Development and Power Plants” UNU-GTP and LaGeo, El Salvador, January 16–22, 2011. Foto ISAGEN 2011.



de megavatios de energía, los cuales continuarán fluyendo por algunos miles de millones de años más, razón por la cual se considera un fuente ilimitada de energía.

Los recursos geotérmicos han sido usados desde la antigüedad con fines medicinales y agropecuarios. En la actualidad existen plantas de generación con más de cien años. El mayor productor del mundo es Estados Unidos donde se genera un promedio anual de 15 mil millones de kW/h lo que equivalen a la combustión de cerca de 25 millones de barriles de petróleo o su equivalente en carbón.

El desarrollo y uso de un campo geotérmico implica el diseño y construcción de una serie de pozos de producción y de reinyección, vías, líneas de conducción de fluidos y de energía eléctrica. El vapor una vez realiza el trabajo en la turbina es condensado y se reinyecta al reservorio geotérmico, junto con los fluidos de menor temperatura que son colectados en los separadores de vapor y agua. Los pozos de producción y de reinyección son aislados con tuberías de recubrimiento, igualmente se cementa el espacio entre la pared del pozo y la tubería de recubrimiento. Para condensar el vapor comúnmente se usan torres de enfriamiento con un circuito de agua en ciclo cerrado. Estas acciones genéricas y comunes a esta tecnología son de vital importancia para considerar este tipo de energía como limpia y renovable, por las siguientes razones:

- El vapor usado para generación proveniente del pozo, se recupera y condensa con el fin de reinyectarlo al reservorio geotérmico, por tanto este no se emite a la atmósfera
- Para condensar el vapor se requiere un sistema de enfriamiento. La forma más eficiente de enfriamiento para el trópico es con agua en ciclo cerrado, por tanto las demandas de agua superficial es baja, solo para reposición del agua evaporada en el proceso de enfriamiento
- Mientras la planta se encuentre en producción el agua y vapor fluyen desde el reservorio hacia la planta. El vapor condensado y el agua colectada en los separadores de vapor se reinyecta. De esta manera se mantiene un flujo de agua constante desde el reservorio hacia la planta y de esta al reservorio.
- No se generan vertimientos líquidos provenientes del proceso de generación, pues los fluidos son reinyectados
- Los pozos de producción son revestidos internamente de manera que se evita la contaminación de las aguas subterráneas con aguas calientes provenientes del reservorio
- Los pozos de reinyección son revestidos internamente de manera que se evita la entrada de aguas subterráneas frías al reservorio
- El recurso geotérmico está disponible todo el año independientemente de las variaciones climáticas o hidrológicas

- La energía geotérmica podría desplazar una parte importante del consumo de carbón y gas utilizado para generación de energía eléctrica
- La geotermia contribuye con la reducción de la emisión de Gases de Efecto de Invernadero
- Las instalaciones para geotermia demandan porciones pequeñas de territorio para su desarrollo
- Si se mantiene el equilibrio energético entre la extracción de los fluidos geotérmicos y la reinyección de los condensados al reservorio, este mantendrá su producción de manera indefinida o mientras no se agote la fuente de calor

### 3.5.2 Emisiones atmosféricas

Es común apreciar fotografías e imágenes de centrales geotérmicas con penachos de lo que a simple vista parecen emisiones atmosféricas. Sin embargo estos penachos son principalmente vapor de agua y una fracción menor de gases no condensables como CO<sub>2</sub>, que provienen de purgas y válvulas de alivio o escapes de presión de manera ocasional o vapor de agua que sale de la torre de enfriamiento.

En una planta geotérmica no se usan combustibles fósiles y por tanto está no emite gases de combustión. La energía requerida para los sistemas de arranque, lubricación y control requerida, cuando la planta se encuentra apagada, se toma de la red eléctrica nacional y solo en determinados casos se dispone de un motor diésel para el arranque en negro (black start) o cuando la red no suministra energía, lo cual es una situación excepcional. Este tipo de plantas tienen un factor de operación cercano al 90%, es decir operan de manera continua por lo menos 330 días al año.

Con base en un estudio de caso para plantas de generación de energía de diferente tecnología, existentes en Los Estados Unidos de América, la Asociación Internacional de Geotermia (IGA) afirma: *“Un estudio de caso de una planta de carbón con lavadores de gases y otras tecnologías de control de emisiones emite al día; 24 veces más dióxido de carbono; 10.837 veces más dióxido de azufre, y 3.865 veces más óxidos de nitrógeno por megavatio hora que una planta de energía geotérmica de vapor.”*

Un ejemplo de las emisiones de gases a la atmósfera para diferentes tecnologías, de acuerdo con el estudio de caso reportado por la IGA se muestra en la siguiente Tabla.

Es importante tener en cuenta que las emisiones relacionadas corresponden a la operación de los proyectos de generación y no al ciclo de vida del combustible, es decir no incluye las emisiones por exploración y explotación de los diferentes combustibles fósiles.

**Tabla 2 Estudio de caso de emisión de contaminantes<sup>17</sup>**

Emisión	Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	Material particulado (PM)	Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )
Impactos esperados	Irritación de los pulmones, Tos, formación de smog, Deterioro de la calidad del agua.	Problemas respiratorios, opresión en el pecho, enfermedades respiratorias, daño del ecosistema	Asma, bronquitis, cáncer, deposición atmosférica, disminución de la visibilidad.	Calentamiento global, aumento del nivel del mar, riesgo de inundaciones, derretimiento de los glaciares
Planta geotérmica	0	0-0,35	0	0-88,8
Planta de carbón	4,31	10,39	2,23	2.191
Emisiones compensadas por explotación geotérmica (millón ton/año)	32	78	17	16.000.000

\* Las plantas geotérmicas no emiten dióxido de azufre directamente. El sulfuro de hidrógeno se libera en forma de gas a la atmósfera, con el tiempo se transforma en dióxido de azufre y ácido sulfúrico. Por lo tanto, ningún tipo de emisiones de dióxido de azufre relacionadas con la energía geotérmica se derivan de las emisiones de sulfuro de hidrógeno.

**Tabla 3 Emisión de contaminantes por diferentes tecnologías<sup>18</sup>**

Emisión lb/MWh	Carbón	Aceite combustible	Gas natural	Geotermia
Óxidos de nitrógeno	4,31	4	2,96	0
Dióxido de azufre	10,39	12	0,22	0,35
Material particulado	2,23	—	0,14	0

Aunque a las plantas de geotermia se les asocia otras emisiones como ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e incluso mercurio, el contenido de éstos en los fluidos es muy bajo y existen técnicas para atraparlos, por lo cual esto no constituye un problema ambiental y no se incluyen como tal en la literatura especializada.

<sup>17</sup> A Guide to Geothermal Energy and the Environment. By Alyssa Kagel, Diana Bates, & Karl Gawell. Geothermal Energy Association, 209 Pennsylvania Avenue SE, Washington, D.C. 20003. Phone: (202) 454-5261 Fax: (202) 454-5265, www.geo-energy.org, Updated April 2007.

<sup>18</sup> Ver referencia 17.



### 3.5.3 Vertimientos líquidos y sólidos

Normalmente las plantas geotérmicas en operación no producen vertimientos líquidos o residuos sólidos. Los fluidos geotérmicos son ricos en sales y minerales que se precipitan en los separadores formando una salmuera, la cual es reinyectada al reservorio junto con los fluidos condensados.

La geotermia tuvo sus comienzos en la explotación de esta salmuera para extraer algunos minerales valiosos, la salmuera podría ser aprovechada de acuerdo con el contenido mineral y propiedades específicas, lo cual solo es posible saber cuándo un campo y su planta asociada entra en operación.

Durante la fase de exploración y desarrollo del campo, específicamente durante las actividades de perforación de pozos de reinyección o producción se puede producir algún tipo de lodos de perforación y residuos de perforación, los cuales son manejados en un relleno para tal fin.

Durante la operación los residuos líquidos y sólidos son producidos en actividades de mantenimiento y oficinas, estos deben ser tratados de acuerdo con las normas específicas para el manejo de los mismos de cada país.

Adicional a lo anterior es importante mencionar que en algunas plantas existentes en el mundo se ha limitado la reinyección de fluidos por considerarlos de utilidad para otros usos, estos casos son:

- Estados Unidos de América: campo Amedee en el noreste de California, los efluentes almacenados en un tanque produjeron un cambio positivo en la condiciones de humedad y se limitó la reinyección de los mismos
- Estados Unidos de América: campo los Geysers, a este campo se transportan cerca de 11 millones de galones de aguas residuales tratadas por día, provenientes de la comunidad de Santa Rosa, los cuales eran vertidos a un cuerpo natural. Ahora son reinyectados al campo geotérmico.
- México: una laguna de evaporación fue ocupada por varias especies de pájaros silvestres y por tanto este se ha mantenido con este fin
- Islandia: los efluentes de un planta geotérmica produjeron una laguna azul, que es hoy en día una atracción turística

Por otra parte es claro que una planta geotérmica requiere poca agua fresca para operar, solo la suficiente para suplir los servicios básicos de los empleados y el circuito de enfriamiento, en promedio se consumen 5 galones/MWh, mientras que una planta térmica a gas de 500 MW podría consumir cerca de 360 galones/MWh.

### 3.5.4 Uso del terreno y ruido

Las instalaciones geotérmicas demandan poco espacio para su construcción y operación y aunque el campo geotérmico podría ocupar extensas áreas, es importante tener en cuenta que la ocupación es puntual y solamente se usan áreas para plataformas de perforación e instalación de cabezas de pozo, vías de acceso, corredores para líneas de conducción de fluidos, la línea de conexión y la planta geotérmica. Las líneas de conducción de fluidos se construyen con aislamiento térmico y a una altura cercana a un (1) metro de altura. La infraestructura del campo y la planta generalmente ocupa menos del 10% del área del campo geotérmico.

La Asociación Internacional de Geotermia (IGA) cita como ejemplo de lo anterior el área demandada por varios tipos de proyectos de generación, como sigue:

**Tabla 4 Áreas demandadas por diferentes tipos de proyectos de generación<sup>19</sup>**

Tecnología	Área requerida m <sup>2</sup> /GWh	Observación
Carbón	3.642	Incluye la actividad de la minería
Solar térmica	3.561	Para un proyecto fotovoltaico con estación central no en azoteas de edificios
Solar fotovoltaica	3.237	
Geotérmica	404	Área ocupada por las turbinas y vías de servicio

**Figura 15 Línea de conducción y cabeza de pozo en campos geotérmicos mexicanos<sup>20</sup>**



<sup>19</sup> Ver referencia 17.

<sup>20</sup> Línea de conducción y cabeza de pozo en campos geotérmicos mexicanos, Tomado de: GEOTHERMAL ACTIVITY AND DEVELOPMENT IN MEXICO, GEOTHERMAL TRAINING PROGRAMME. Magaly Flores Armenta and Luis C. A. Gutiérrez Negrin. CFE-GPG. Comisión Federal de Electricidad and Mexican Geothermal Association. Gerencia de Proyectos Geotermoelectricos. UNITED NATIONS UNIVERSITY. GEOTHERMAL TRAINING PROGRAMME, enero de 2011.

En cuanto al ruido, los niveles de ruidos en los alrededores de la planta y los cabezales de pozo son cercanos a los 50 db, que es un nivel de ruido bajo, esto se debe a que no existe una fuente de combustión y los equipos electromecánicos se encuentran aislados en la casa de máquinas.

Estas condiciones particulares de la Geotermia permiten que dentro de los campos geotérmicos se puedan realizar al mismo tiempo actividades de agricultura y conservación, ejemplos de ello son: El campo de los Geysers rodeado de un extensa área silvestre en Estados Unidos de América; La laguna azul, sitio de interés turístico en Islandia; La planta de Hatchubaru rodeada de un Parque Nacional Natural en Japón e incluso algunos desarrollos geotérmicos dentro de los mismos Parques Nacionales en Nigeria.

En este sentido la geotermia debe ser vista como un aliado de la protección de los recursos naturales y sobre todo para ecosistemas sensibles, donde se requiere de un gran esfuerzo institucional y de recursos para la conservación. La tecnología es una alternativa para la generación de energía que satisface los requerimientos del desarrollo sostenible.

De otra parte, aunque existe la percepción de la ocurrencia de una serie de fenómenos como subsidencia, deslizamientos y sismicidad asociados a la geotermia, estos han sido estudiados extensamente en campos geotérmicos concluyendo lo siguiente:

- **Subsidencia:** este fenómeno se puede dar por la pérdida de capacidad de soporte de la roca por disminución del fluido que contienen los poros de las rocas. Aunque es un fenómeno poco común la probabilidad de ocurrencia de este se circunscribe al campo geotérmico y se disminuye el riesgo manteniendo constante la tasa reinyección de fluidos.
- **Sismicidad:** es posible que en un área de un campo geotérmico se incremente la sismicidad, inducida por el continuo movimiento de los fluidos geotérmicos en las fallas y diaclasas por donde circulan. En estos casos, la sismicidad resultante es de baja magnitud y se denomina microsismos con magnitudes Richter debajo de 2 o 3, los cuales no son detectados por los seres humanos y no se considera un peligro para las plantas de energía o las comunidades circundantes. De otra parte se debe tener en cuenta que la geotermia se desarrolla en zonas volcánicas, tectónicamente activas donde comúnmente ocurren sismos o eventos volcánicos que no son atribuibles al desarrollo del campo geotérmico.
- **Deslizamientos:** igualmente los deslizamientos y movimientos en masa pueden tener origen en sismos, la actividad volcánica o tectónica, considerando que los deslizamientos son el resultado de una serie de factores como la pendiente, la escorrentía y la misma actividad volcánica. Algunos deslizamientos menores causados por la construcción de vías o terraplenes para el desarrollo deben ser previstos y atendidos de manera adecuada durante la construcción y operación de la planta de generación y el campo.

# ESTADO Y PERSPECTIVAS DE LA GEOTERMIA

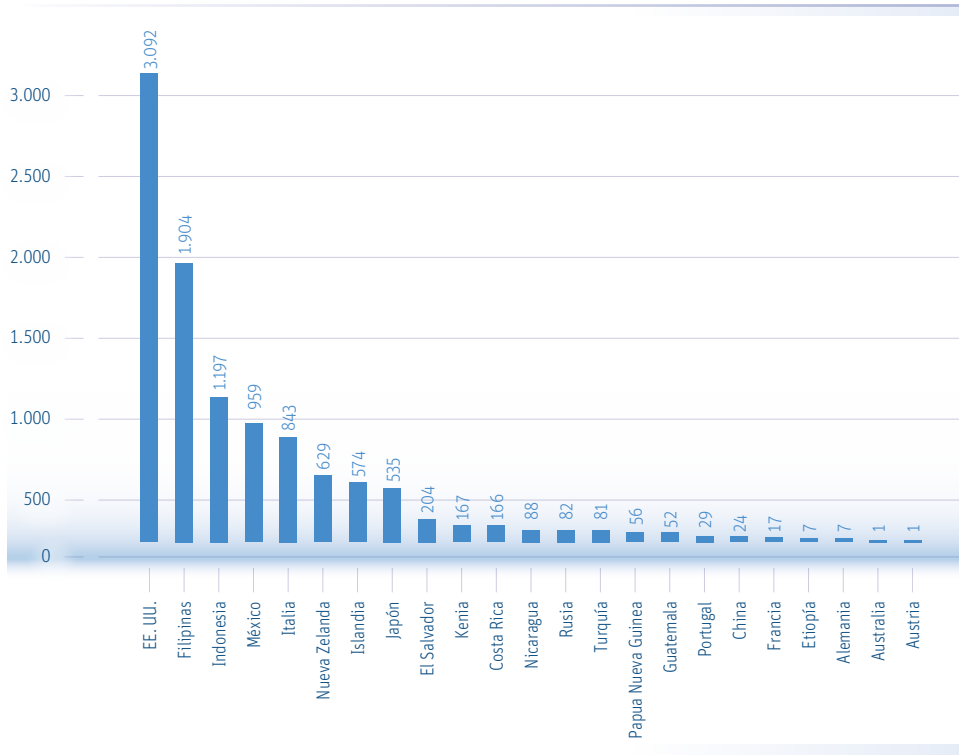
## 4

### 4.1. Capacidad instalada en el mundo

En el mundo existen cerca de 11.000 MW de capacidad instalada en geotermia. Algunos países como los Estados Unidos, Filipinas, Indonesia, México, Italia, Nueva Zelanda, Islandia y Japón suman en conjunto, el 90% de la capacidad instalada total, como se muestra en la Tabla 5.

Países como Islandia y El Salvador tienen una capacidad instalada en geotermia más baja, si se comparan con Estados Unidos, Filipinas, Indonesia o México. Sin embargo estos usan

**Figura 16** Capacidad instalada en 2010 (MW) en el mundo<sup>21</sup>



<sup>21</sup> Geothermal Power Generation in the World 2005–2010. Update Report. Ruggero Bertani. <http://iea-gia.org/documents/LongTermGeothermElecDevelopWorld-Bertanioffenburg23Feb09.pdf>.

**Tabla 5 Capacidad y tipo de Plantas instaladas en el mundo para el año 2010<sup>22</sup>:**

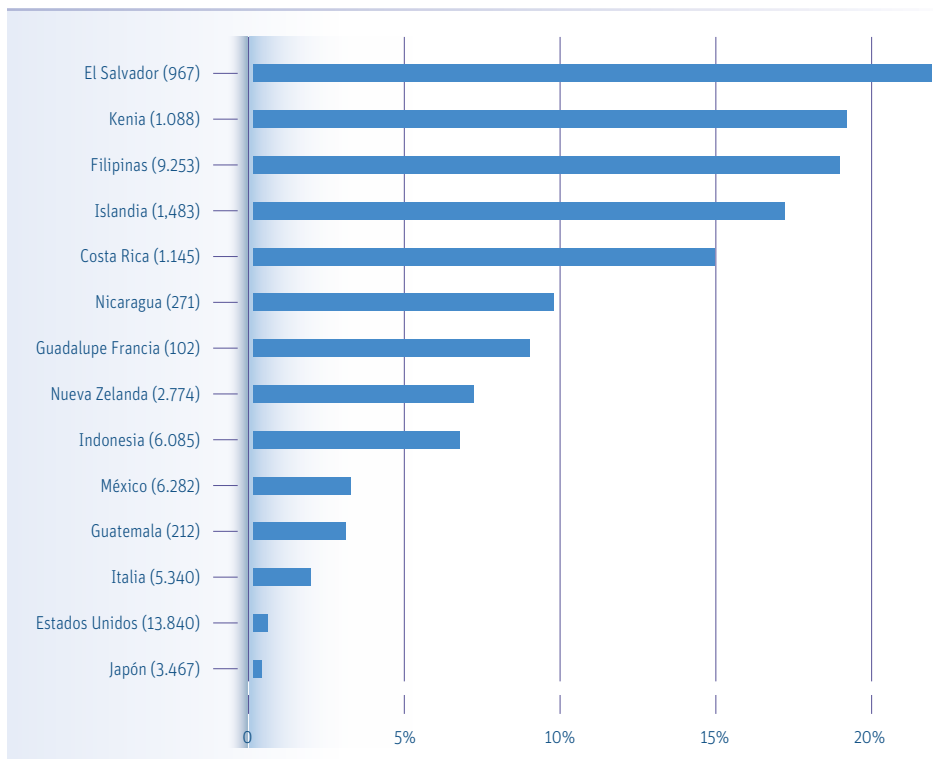
País	Flash (contrapresión)		Binaria		Flash (una etapa)		Flash (multietapa)		Vapor seco1		Total	
	MW	Unidades	MW	Unidades	MW	Unidades	MW	Unidades	MW	Unidades	MW	Unidades
EE. UU.			653	149	59	4	795	30	1.585	25	3.092	208
Filipinas			209	18	1.330	31	365	7			1.904	56
Indonesia	2	1			735	14			460	7	1.197	22
México	75	15	4	2	410	15	470	5			959	37
Italia					88	5			755	28	843	33
Nueva Zelanda	47	5	137	24	290	12	100	1	55	1	629	43
Islandia			10	8	474	14	90	3			574	25
Japón			2	2	349	14	160	3	24	1	535	20
El Salvador			9	1	160	5	35	1			204	7
Kenia			14	3	153	7					167	10
Costa Rica	5	1	21	2	140	3					166	6
Nicaragua	10	2	8	1	70	2					88	5
Rusia					82	11					82	11
Turquía			14	2	20	1	47	1			81	4
Papua Nueva Guinea	6	1			50	2					56	3
Guatemala			52	8							52	8
Portugal			29	5							29	5
China							24	8			24	8

**Tabla 5 Capacidad y tipo de Plantas instaladas en el mundo para el año 2010<sup>22</sup>: (continuación)**

País	Flash (contrapresión)		Binaria		Flash (una etapa)		Flash (multietapa)		Vapor seco <sup>1</sup>		Total	
	MW	Unidades	MW	Unidades	MW	Unidades	MW	Unidades	MW	Unidades	MW	Unidades
Francia			2	1	10	1	5	1			17	3
Etiopía			7	2							7	2
Alemania			7	3							7	3
Australia			1	2							1	2
Austria			1	3							1	3
Tailandia							0	1			0	1
<b>TOTAL</b>	<b>145</b>	<b>25</b>	<b>1.180</b>	<b>236</b>	<b>4.420</b>	<b>141</b>	<b>2.091</b>	<b>61</b>	<b>2.879</b>	<b>62</b>	<b>10.715</b>	<b>525</b>

<sup>22</sup> Ver referencia 21.

**Figura 17 Generación de energía y aporte de energía geotérmica por país<sup>23</sup>**



Catorce países con la mayor participación de energía geotérmica de su generación eléctrica nacional. Los números entre paréntesis son la producción de electricidad a partir de la geotermia en GWh en 2004.

la geotermia de manera intensiva y la misma constituye una parte importante de su matriz energética.

## 4.2. Perspectivas de crecimiento en el mundo

Para los próximos años se predice un incremento importante de la capacidad instalada de geotermia en el mundo y en consecuencia, de la generación y aporte de energía eléctrica. Se calcula que el crecimiento más acelerado será en Estados Unidos, que además tiene programas de apoyo y financiación de las actividades de exploración geotérmica. También se espera un aumento de la capacidad instalada de la geotermia en Indonesia, Islandia y Nueva Zelanda.

<sup>23</sup> Ver referencia 21.



**Tabla 6 Crecimiento de la capacidad instalada y generación geotérmica<sup>24</sup>**

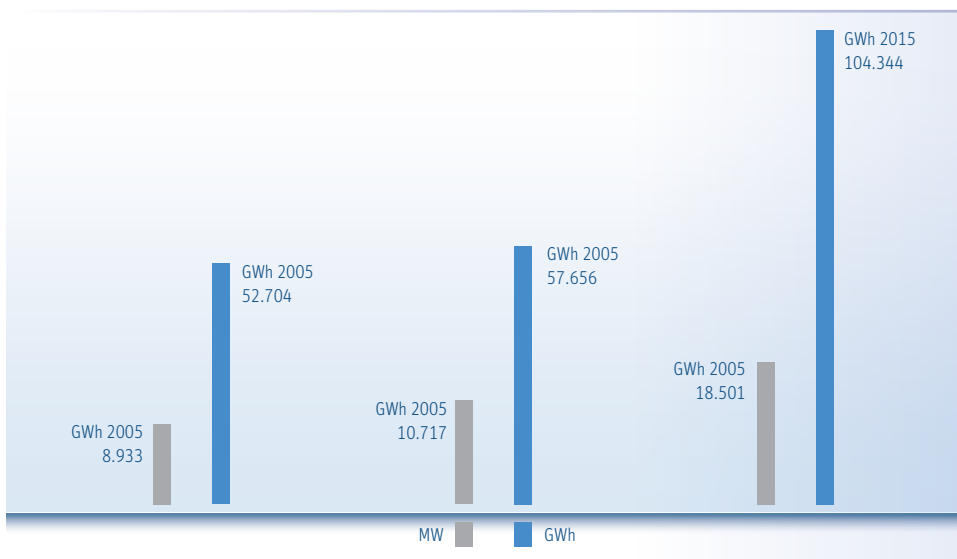
País	Instalado 2005 MW	Energía 2005 GWh	Instalado 2010 MW	Energía 2010 GWh	Pronóstico 2015 MW	Incremento desde 2005			
						MW	GWh	Capacidad %	Energía %
EE. UU.	2.564	13.840	3.093	16.603	5.400	530	-237	21%	-1%
Indonesia	797	6.085	1.197	10	3.500	400	4	50%	58%
Islandia	202	1.483	575	4.597	800	373	3	184%	210%
Nueva Zelanda	435	2.774	628	4.055	1.240	193	1.281	44%	46%
Turquía	20	105	82	490	200	62	385	308%	368%
El Salvador	151	967	204	1.422	290	53	455	35%	47%
Italia	791	5.340	843	5.520	920	52	180	7%	3%
Papua Nueva Guinea	6	17	56	450	75	50	433	833%	254%
Kenia	129	1.088	167	1.430	530	38	342	29%	31%
Guatemala	33	212	52	289	120	19	77	58%	36%
Portugal	16	90	29	175	60	13	85	78%	94%
Nicaragua	77	271	88	310	240	11	39	14%	15%
Alemania	0	1,5	7	50	15	6	49	3%	3%
México	953	6.282	958	7.047	1.140	5	766	1%	12%
Rusia	79	85	82	441	190	3	356	4%	419%
Costa Rica	163	1.145	166	1.131	200	3	-14	2%	-1%
Francia	15	102	16	95	35	2	-7	10%	-7%

**Tabla 6 Crecimiento de la capacidad instalada y generación geotérmica<sup>24</sup> (continuación)**

País	Instalado 2005 MW	Energía 2005 GWh	Instalado 2010 MW	Energía 2010 GWh	Pronóstico 2015 MW	Incremento desde 2005			
						MW	GWh	Capacidad %	Energía %
Australia	0	0,5	1	1	40	1	0	633%	5%
Japón	535	3.467	536	3.064	535	1	-404	0%	-12%
Austria	1	3,2	1	4	5	0	1	27%	19%
Etiopía	7	0	7	10	45	0	10	0%	%
Tailandia	0	2	0	2	1	0	0	0%	11%
Argentina	0	0	0	0	30	0	0		
Canadá	0	0	0	0	20	0	0		
Chile	0	0	0	0	150	0	0		
Eslovaquia	0	0	0	0	5	0	0		
España	0	0	0	0	40	0	0		
Grecia	0	0	0	0	30	0	0		
Honduras	0	0	0	0	35	0	0		
Holanda	0	0	0	0	5	0	0		
Hungría	0	0	0	0	5	0	0		
Nevis	0	0	0	0	35	0	0		
Rumania	0	0	0	0	5	0	0		
China	28	96	24	150	60	-4	54	-13%	57%
Filipinas	1.930	9.253	1.904	10.311	2.500	-26	1	-1%	11%
<b>TOTAL</b>	<b>8.933</b>	<b>52.704</b>	<b>10.717</b>	<b>57.656</b>	<b>18.501</b>	<b>1.785</b>	<b>3.859</b>	<b>2.327%</b>	<b>1.678%</b>

<sup>24</sup> Ver referencia 21.

**Figura 18 Crecimiento de la capacidad instalada y generación geotérmica<sup>25</sup>**



A nivel latinoamericano el país donde se prevé un mayor crecimiento de este tipo de energéticos es México, que en 2010 contaba con cerca de 1.000 MW instalados y en operación. También se espera que crezca la capacidad instalada en otras naciones de la región, tales como Nicaragua, Guatemala, El Salvador, Chile y Colombia, entre otros.

### 4.3. DESARROLLO DE LA GEOTERMIA EN COLOMBIA

Actualmente Colombia no cuenta con generación de energía eléctrica aprovechando la geotermia. A pesar de que en el país se han realizado diversos estudios desde la década del 70 sobre el potencial geotérmico y de la existencia de políticas de Estado para promover este tipo de tecnologías, esta aún no se ha desarrollado.

Existe una serie de causas que pueden explicar el lento desarrollo de la geotermia en el país, entre ellas:

- Los estudios para la exploración y el modelamiento del recurso son altamente especializados y costosos.

<sup>25</sup> Ver referencia 21.

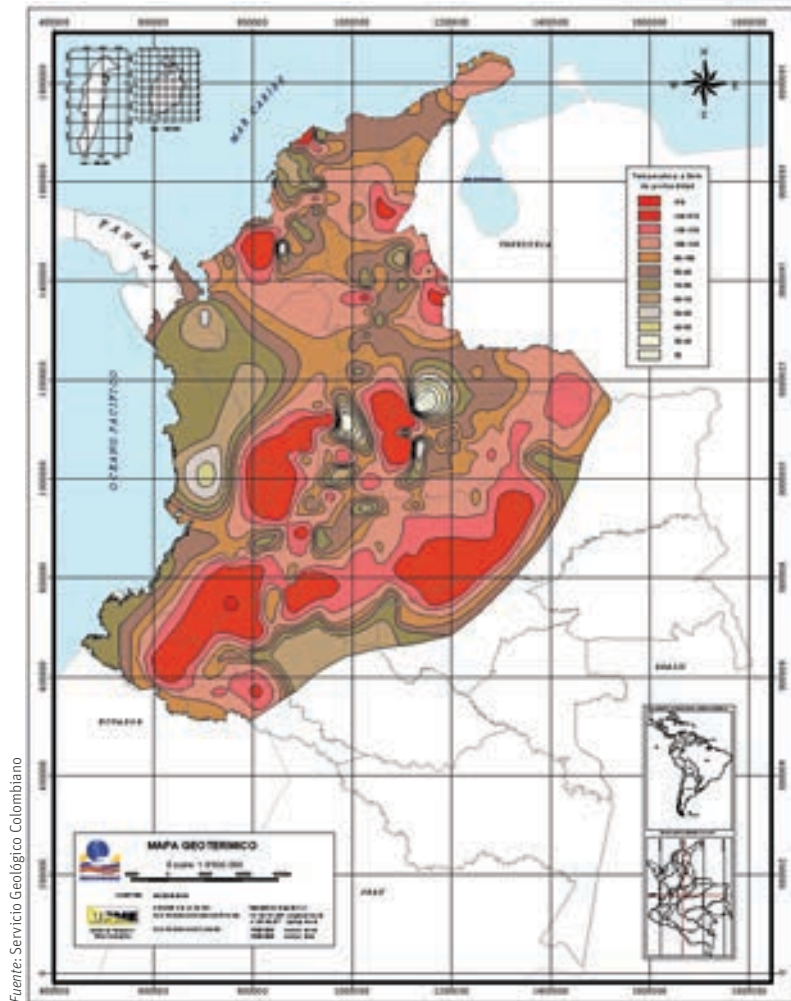
- El País cuenta con una capacidad técnica y científica limitada para la exploración y desarrollo del recurso.
- Las etapas preliminares de exploración implican cuantiosas inversiones, con un alto nivel de riesgo.
- Las áreas con potencial geotérmico se localizan en regiones volcánicas, con infraestructura limitada para el acceso y la conexión al Sistema de Transmisión Nacional (STN).
- Los costos de exploración de la geotermia e instalación son altos, lo cual disminuye su atractivo para potenciales desarrolladores de proyecto y su competitividad en el mercado.
- Las normas para el desarrollo y el aprovechamiento del recurso, no han sido desarrolladas y aplicadas por las entidades encargadas de la administración y los promotores de proyectos.
- La regulación del mercado de energía, no tiene establecidos los mecanismos para reconocer los aportes de la geotermia a la confiabilidad y firmeza del sistema.
- La comunidad desconoce los beneficios y riesgos reales asociados al uso del recurso.

El Servicio Geológico Colombiano (Antes INGEOMINAS), consciente de la importancia de la geotermia, ha realizado grandes esfuerzos por inventariar y caracterizar el recurso. De manera independiente una empresa del sector de energía adelantó en los años 90 una perforación de un pozo exploratorio de geotermia, en la zona del Nevado del Ruiz, sin ningún éxito.

A partir del año 2008 ISAGEN inicia una serie de estudios técnicos con el fin de promover y desarrollar esta tecnología, los estudios adelantados por ISAGEN se pueden resumir como sigue:

- Estudio del potencial de generación geotérmica en Colombia. ISAGEN 2008–2009. BOSTON PACIFIC INC, con el apoyo financiero de la AGENCIA PARA EL DESARROLLO DEL COMERCIO DE LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA (USTDA). Mediante este estudio se seleccionaron y priorizaron las áreas con mayor potencial geotérmico en el país. Se definieron los estudios requeridos para dar continuidad al desarrollo de la geotermia en dos áreas específicas.
- Proyecto de investigación: Modelamiento del sistema hidrotermal magmático en áreas con potencial geotérmico en el Macizo Volcánico del Ruiz, Colombia. ISAGEN 2010–2012, con el apoyo técnico y científico del departamento de Geociencias de la UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, sede Bogotá; el SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (antes INGEOMINAS) y el DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE CIENCIA TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN (COLCIENCIAS). Los estudios incluyeron la toma de fotografías aéreas y restitución cartográfica, el levantamiento de la geología de detalle y alteraciones hidrotermales, los estudios de geoquímica, hidrogeología, geofísica (gravimetría y magnetometría) y la perforación de pozos de gradiente térmico, así

**Figura 19** Áreas de interés geotérmico en Colombia<sup>26</sup>



Fuente: Servicio Geológico Colombiano

como la elaboración de una primera aproximación al modelo hidrotermal magmático del área de estudio.

- Proyecto de investigación: Modelo resistivo del subsuelo con sondeos de magnetotelúrica (MT) en un sector del área de estudio. ISAGEN 2011-2012, con el apoyo técnico

<sup>26</sup> Servicio Geológico Colombiano (antes INGEOMINAS). INGEOMINAS - ANH 2008. [http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/docu-mentacion/energias\\_alternativas/potencialidades/mapaGeotermia.pdf](http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/docu-mentacion/energias_alternativas/potencialidades/mapaGeotermia.pdf).

y científico del SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (antes INGEOMINAS), el CENTRO INTERNACIONAL DE FÍSICA (CIF); la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (UNAM) y el DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE CIENCIA TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN (COLCIENCIAS). Mediante esta investigación se realizaron 105 sondeos de MT en un sector de las zonas de interés y se elaboró para esta área el modelo resistivo del subsuelo.

- Estudio de Prefactibilidad para el Campo Geotérmico del Macizo Volcánico del Ruiz. Colombia. ISAGEN – BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO (BID) (Fondo Japonés de Consultoría) 2011–2013. CONSORCIO NIPPON KOEI, GEOTHERMAL E, INTERGAL S.A. Integración de la información de los estudios básicos y modelos, elaboración del modelo geotérmico conceptual. Selección de blancos de perforación, diseño de pozos de exploración, elaboración del estudio de impacto ambiental y el plan de desarrollo del campo.
- Inversiones catalizadoras para energía geotérmica Colombia. ISAGEN – BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO (BID/FMAM), 2011–2014. Complementación del modelo resistivo del subsuelo mediante sondeos de magnetotelúrica. Asesoría y acompañamiento para la fase de perforación exploratoria y asesoría para la estructuración financiera del proyecto. (en ejecución).

#### 4.3.1 Logros del proyecto

Como se puede evidenciar, el avance del proyecto se debe al esfuerzo conjunto de varias entidades nacionales e internacionales, consultores y expertos internacionales que han contribuido a desarrollar el proyecto y a la construcción de la capacidad nacional y regional para el desarrollo de la geotermia, lo que el BID ha catalogado como “*Inversiones Catalizadoras para Energía Geotérmica*” por su carácter de catalizador, facilitador o medio para el desarrollo de esta tecnología en Colombia, que sin el concurso de todas las entidades mencionadas no hubiese sido posible.

Este esfuerzo se puede ver reflejado en el emprendimiento de un nuevo proyecto de geotermia de carácter binacional, entre Ecuador y Colombia que se localiza en la frontera entre los dos países, cerca de los volcanes de Chiles, Tufiño y Cerro Negro. Proyecto en el cual se están aplicando las experiencias y el conocimiento adquirido en la ejecución del proyecto geotérmico del Macizo Volcánico del Ruiz.

De manera específica, algunos logros de este proyecto se pueden resumir como sigue:

#### Logros técnicos

- se mejoró el conocimiento de la estructura y características del Macizo Volcánico del Ruiz

- Elaboración y obtención de la geología de detalle, geología estructural, hidrogeología, geofísica y geoquímica del Macizo Volcánico del Ruíz.
- Identificación de sistemas geotérmicos y elaboración de un modelo geotérmico conceptual del área de estudio.
- Perforación y registro geofísico de tres (3) pozos de gradiente térmico
- Selección de nueve (9) sitios con potencial para perforación exploratoria
- Diseño de pozos, vías de acceso, plataformas y estudios ambientales para la etapa de perforación exploratoria

### **Fortalecimiento institucional y creación de capacidad técnica**

- Se dotó a la UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA y al SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO de modernos equipos de laboratorio y campo para la exploración geotérmica y otras aplicaciones.
- Se realizó una campaña de difusión de resultados del proyecto y de la tecnología en cinco (5) ciudades del país (Bogotá, Manizales, Pereira, Ibagué y Medellín) con la participación de entidades del sector ambiental, del sector de energía, universidades, la comunidad y la empresa privada. En estas reuniones se entregó material técnico de divulgación de la tecnología.
- Se han invertido recursos por cerca de USD \$6'000.000, provenientes de recursos propios de ISAGEN, cofinanciación y aportes de COLCIENCIAS; el BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO, la AGENCIA PARA EL DESARROLLO DEL COMERCIO DE ESTADOS UNIDOS; la UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA; el SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO y el CENTRO INTERNACIONAL DE FÍSICA.

### **Capacitación, formación profesional**

- cerca de 40 personas del SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO (antes INGEOMINAS); profesores, estudiantes de posgrado y pregrado de la UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, apoyados por profesionales de ISAGEN, el BID, COLCIENCIAS y expertos de la empresa Boston Pacific Inc; la UNAM, el CIF y el Consorcio NIPPON KOEI – GEOTHERMAL E – INTEGRAL K, trabajaron y se capacitaron en el proyecto con los siguientes resultados:
  - Se elaboraron seis (6) tesis de maestría en alteraciones hidrotermales; geología estructural; geoquímica; fluidos geotérmicos; geofísica y cromatografía de gases; siete (7) tesis de pregrado en: petrografía; microtermometría; difracción de rayos x e inclusiones fluidas.
  - Se realizaron diferentes cursos y talleres de trabajo en el país en el exterior con expertos de estados Unidos, Japón y el Salvador en; geoquímica, geofísica, interpretación y análisis de resultados.
  - Se participó en seminarios y eventos internacionales, mediante la presentación de ponencias y artículos científicos sobre aspectos específicos de investigación, en Hungría;

Estados Unidos, y en el XIII Congreso Latinoamericano de Geología y XIV Congreso Colombiano de Geología en Medellín, Colombia.

- Se realizaron pasantías para el análisis de muestras de laboratorio en Estados Unidos y El Salvador.

Son variados los logros y las lecciones aprendidas para el desarrollo del proyecto, pero quizás el más importante ha sido el de aglutinar diferentes entidades, expertos y recursos en busca de un objetivo común, en pro del avance de la geotermia, lo que en términos estrictos se traduce en la creación de *valor compartido*, para la sociedad y el país.

#### **4.3.2 Lecciones aprendidas y retos para el desarrollo de la geotermia**

De la ejecución y desarrollo del proyecto es posible extraer una serie de lecciones aprendidas, las cuales nos han permitido construir los retos que requieren ser superados para el desarrollo de la tecnología. Entre los cuales se destacan:

##### **Técnicos**

- Las áreas potenciales para geotermia se localizan en lugares agrestes de difícil acceso, con condiciones climáticas extremas, donde las máquinas y vehículos requieren de adecuación especial por pérdidas de potencia.
- El personal del proyecto requiere de dotación especial, entrenamiento para trabajo en alturas y acondicionamiento previo al inicio de los trabajos.
- Las perforaciones para geotermia difieren de las perforaciones para petróleo agua o geotecnía. Estas se hacen, por lo general, en rocas duras, cristalinas, en zonas con fracturas y fallas, con la presencia de agua caliente y vapor, por lo que es necesario contar con la participación de personal con experiencia en este tipo de perforaciones.
- Es posible planear y programar las perforaciones con rendimientos medios, sin embargo la duración real dependerá de las características de la roca, fallas y fluidos que se presenten durante la perforación.
- Las zonas de desarrollo de los proyectos se encuentran en áreas de alto riesgo por erupciones volcánicas y flujos de lodo, este aspecto debe ser cuidadosamente evaluado para la localización de pozos de gradiente térmico, pozos de exploración, producción o reinyección, la planta, línea de conexión y líneas de conducción de fluidos.
- La información de campo de geología, alteraciones hidrotermales, geoquímica e hidrología es fundamental para la construcción del modelo geotérmico, por tanto esta fase debe ser planeada y ejecutada cuidadosamente. Se debe contar con mapas y fotografías aéreas de gran escala, buena resolución y actualizadas.



- Existe un gran número de técnicas, métodos y equipos de geofísica, todos estos brindan información importante y útil, pero su aplicación indiscriminada aumenta los costos y el tiempo de ejecución del proyecto. Internacionalmente se encuentra aceptado que la Magnetotelúrica es la técnica que brinda la mejor información para la construcción del modelo geotérmico conceptual.
- Es necesario dar continuidad a la capacitación y formación de personal profesional del país en geotermia, mediante la vinculación de universidades, grupos de investigación y entidades del gobierno al desarrollo de los proyectos para crear la capacidad técnica y científica para la exploración y desarrollo del recurso.

### **Ambientales**

- En Colombia, las zonas potenciales para la geotermia se encuentran en zonas de paramo y reserva forestal, que también son usadas para cultivos de papa y ganadería de leche. La infraestructura para el desarrollo del campo y la planta de geotermia deben ser planeadas para ser construidas en las áreas ya intervenidas.
- La infraestructura y planta de generación solo ocupan pequeñas áreas de un campo geotérmico. De acuerdo con esto, las áreas no usadas de los campos geotérmicos se pueden destinar para protección y recuperación del páramo, bosque de niebla, bosque alto andino y fauna asociada.
- Las plantas de geotermia generan recursos económicos por transferencias de ley y otros. Estos recursos pueden ser usados para la adquisición de tierras de las áreas no usadas en los campos geotérmicos y el manejo conjunto del campo con las autoridades ambientales, para la conservación del páramo.
- Las autoridades, las comunidades indígenas y la comunidad en general desconocen las características de esta tecnología y existe un temor generalizado sobre su relación con sismos y erupciones volcánicas. Se requiere realizar una intensa labor de capacitación sobre las características de la geotermia.
- Se requiere explorar la potencialidad de otros usos de la geotermia en el país, (agricultura, acuicultura, calefacción, extracción de minerales, recreación y turismo) los cuales podrían ser desarrollados de manera conjunta con la generación de energía eléctrica.
- De acuerdo con la experiencia lograda en el desarrollo del proyecto del Macizo Volcánico del Ruiz, se considera pertinente adecuar el proceso de licenciamiento ambiental a las características propias de la tecnología y el proceso de desarrollo, como se propone en el Capítulo 6.

### **Financieros y regulatorios**

- Los estudios para la exploración y el modelamiento del recurso son altamente especializados y costosos; las etapas preliminares de exploración implican cuantiosas inversiones,

con un alto nivel de riesgo. De acuerdo con lo anterior estas primeras etapas de desarrollo o de mayor riesgo deberían ser adelantadas con el concurso del Estado.

- Es necesario establecer los mecanismos de financiación, apoyo financiero o cubrimiento de riesgos de manera parcial o total para la fase de perforación exploratoria, dado el riesgo asociado a esta fase de los proyectos.
- Los costos de exploración de la geotermia e instalación son altos, esto disminuye su atractivo para potenciales desarrolladores de proyectos y su competitividad en el mercado. Por esto se considera necesario establecer los mecanismos por los cuales el mercado hará el reconocimiento, a esta tecnología, de su posible contribución a la firmeza y confiabilidad del sistema.
- Para este tipo de tecnologías, no convencionales, renovables y más limpias, se deben buscar métodos alternativos de evaluación financiera o usar métodos económicos, que incluyan la valoración e inclusión de variables no valoradas o intangibles asociadas, tales como: contribución a la reducción del cambio climático y a la adaptación del país al mismo; diversificación de la canasta energética; reducción del consumo y dependencia de los combustibles fósiles; aporte de mayor firmeza y confiabilidad al sistema; protección de áreas de interés ambiental y contribución al desarrollo sostenible.

# FASES DE DESARROLLO DE UN PROYECTO GEOTÉRMICO

# 5

EL DESARROLLO DE UN PROYECTO GEOTÉRMICO INCLUYE LA REALIZACIÓN DE LAS ETAPAS comunes para cualquier proyecto energético, con una variante significativa. No es posible comprobar si el recurso geotérmico existe en la cantidad y calidad aprovechable hasta que se ejecute la fase de factibilidad, en la cual se realizan las perforaciones exploratorias y la evaluación del yacimiento; Es decir, después de que se han hecho cuantiosas inversiones a riesgo en estudios y las mismas perforaciones.

Los estudios técnicos previos a la perforación exploratoria son fundamentales, puesto que se requiere la mayor cantidad posible de información geológica, geofísica, geoquímica e hidrogeológica que permita la construcción de un Modelo Conceptual del Sistema Geotérmico, que se acerque más a la realidad, lo cual aumenta la probabilidad de éxito en la exploración. Sin embargo, sólo la perforación exploratoria y la evaluación del yacimiento pueden confirmar la existencia del recurso geotérmico. La exploración geotérmica busca, entre otras cosas, lo siguiente:

- a. Identificar el proceso geotérmico que está ocurriendo;
- b. Identificar si existe un campo geotérmico aprovechable;
- c. Estimar el tamaño del reservorio y la calidad del recurso disponible;
- d. Determinar el tipo de campo geotérmico;
- e. Localizar las zonas productivas y de recarga;
- f. Determinar el contenido calórico de los fluidos presentes en el reservorio;
- g. Determinar los parámetros ambientalmente relevantes, previo a la explotación;
- h. Compilar el mayor número de características del campo y planear su desarrollo y operación;
- i. Establecer las características técnicas y dimensionamiento de la planta de generación;

El desarrollo de un proyecto geotérmico se podría realizar en las fases que se ilustran a continuación:

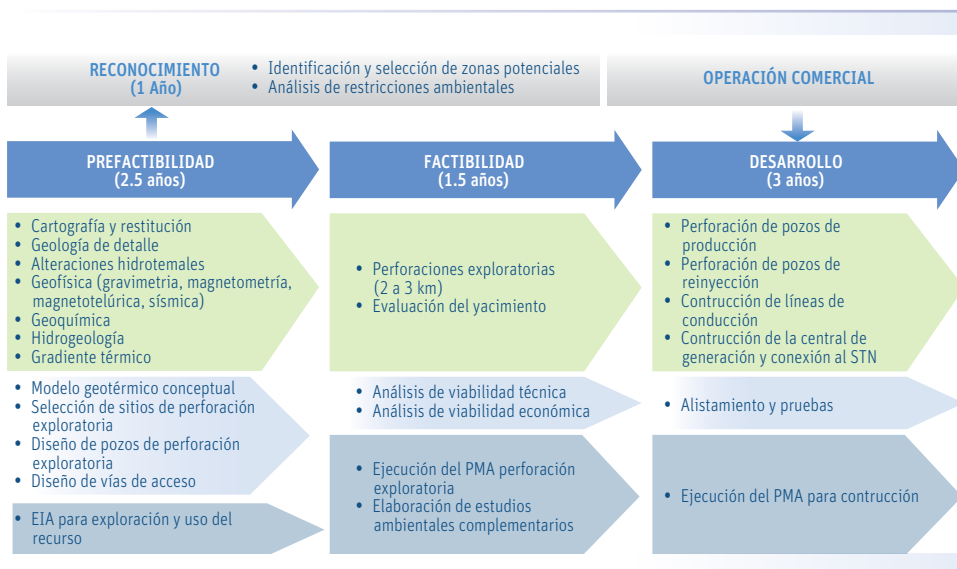
Usualmente el programa de exploración se lleva a cabo paso a paso. En cada fase se deben ir eliminando las áreas menos promisorias y concentrando esfuerzos en aquellas más promisorias. A medida que se desarrolla el programa, los métodos utilizados se tornan cada vez más sofisticados, detallados y costosos, por tanto la magnitud y presupuesto del programa

**Tabla 7 Fases del desarrollo de un proyecto geotérmico<sup>27</sup>:**

Fase	Objeto	Actividades
<b>Fase 1. Reconocimiento</b>	Establecer las zonas con potencial geotérmico. Delimitar las áreas para los estudios técnicos y ambientales de prefactibilidad. Planear los estudios de prefactibilidad.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Identificación de zonas potenciales.</li> <li>2. Análisis de viabilidad preliminar de un desarrollo geotérmico.</li> <li>3. Análisis de restricciones ambientales.</li> <li>4. Planeación de la ejecución de los estudios de prefactibilidad</li> <li>5. Solicitud de permisos de estudios</li> </ol>
<b>Fase 2. Prefactibilidad</b>	Determinar la potencial existencia del recurso geotérmico, la posible localización de la fuente de calor y el reservorio (Modelo Geotérmico Conceptual). Establecer la viabilidad técnica y ambiental del desarrollo de un campo geotérmico.	<ol style="list-style-type: none"> <li>6. Estudios de geología, geofísica, geoquímica e hidrogeología.</li> <li>7. Gradiente térmico.</li> <li>8. Elaboración de modelos geotérmicos.</li> <li>9. Selección de sitios de perforación.</li> <li>10. Diseño de perforaciones exploratorias.</li> <li>11. Elaboración del Estudio de Impacto Ambiental para exploración y uso del recurso.</li> <li>12. Trámite de la licencia ambiental para exploración y uso del recurso.</li> </ol>
<b>Fase 3. Factibilidad</b>	Localizar y llegar hasta el reservorio, obtener fluidos y evaluar la calidad y cantidad disponible del recurso para generación de energía. Realizar análisis de viabilidad técnica, económica y ambiental del proyecto geotérmico. Realizar los diseños requeridos y planear el desarrollo del campo geotérmico y la planta de generación.	<ol style="list-style-type: none"> <li>13. Perforaciones exploratorias.</li> <li>14. Evaluación del yacimiento.</li> <li>15. Análisis de viabilidad técnica y económica del desarrollo de un proyecto geotérmico.</li> <li>16. Diseño de la planta y planeación del desarrollo del campo.</li> <li>17. Ejecución del Plan de Manejo Ambiental para las perforaciones exploratorias.</li> <li>18. Realización de los estudios ambientales complementarios para el desarrollo del campo, construcción y operación de la planta de generación.</li> <li>19. Trámite de la modificación de licencia ambiental para el desarrollo del campo, construcción y operación de la planta.</li> </ol>
<b>Fase 4. Desarrollo del Campo, Construcción de la Planta y Puesta en Operación</b>	Desarrollo del campo geotérmico con criterios de sostenibilidad. Puesta en operación de la planta y el campo geotérmico	<ol style="list-style-type: none"> <li>20. Perforación de pozos de producción y pozos de reinyección.</li> <li>21. Construcción de la planta y obras asociadas (líneas de conducción de agua y vapor, vías de acceso, subestación, línea de conexión).</li> <li>22. Ejecución del Plan de Manejo Ambiental (PMA) para cada una de las actividades de desarrollo del campo.</li> <li>23. Alistamiento y pruebas de la planta y el campo.</li> <li>24. Puesta en operación comercial.</li> <li>25. Ejecución del Plan de Manejo Ambiental para la operación de la planta y el campo geotérmico.</li> </ol>

<sup>27</sup> Convenio ISAGEN – BID/JC. Colombia. Cooperación técnica no reembolsable ATN/JC-12150-CO. Estudios de prefactibilidad para el campo geotérmico del Macizo Volcánico del Ruiz. Programa Estratégico de Investigación y Modelamiento del Sistema Hidrotermal Magmático. 2012.

**Figura 20 Fases del desarrollo de un proyecto geotérmico<sup>28</sup>**



de exploración debería ser proporcional a sus objetivos y a la importancia de los recursos que se espera encontrar.

Así mismo, el programa de exploración debe ser flexible y revaluado continuamente, de acuerdo con los resultados de las distintas prospecciones en cada fase y con la consecuente actualización del Modelo Geotérmico Conceptual.

## 5.1. FASE 1. RECONOCIMIENTO

En esta Fase se deben considerar algunas variables de importancia que pueden afectar el desarrollo del proyecto, entre ellas están:

La existencia de zonas con restricciones ambientales como posibles limitantes para el desarrollo de un proyecto, entre ellas: áreas ambientalmente sensibles, zonas pertenecientes al Sistema de Parques Nacionales Naturales y nivel del conflicto social y político.

La facilidad de acceso a la zona y de la posible evacuación de la energía al Sistema Interconectado Nacional.

<sup>28</sup> Ver referencia 28.

Información geológica sobre la potencialidad del recurso en la zona y la existencia de evidencias del recurso, tales como manantiales termales y zonas de alteración hidrotermal.

La información compilada y el análisis realizado deben conllevar a establecer la viabilidad preliminar del desarrollo de un proyecto geotérmico y a la delimitación de la zona de interés para los estudios de prefactibilidad y la planeación de la ejecución de los mismos.

## **5.2. FASE 2. PREFACTIBILIDAD**

En esta Fase se inicia la exploración para la búsqueda del recurso, la misma tiene como fin aportar la información básica para la construcción del Modelo Geotérmico Conceptual. Las actividades inician con el levantamiento cartográfico, la realización de los estudios técnicos básicos, la elaboración del Modelo Geotérmico Conceptual y la selección de sitios para perforación exploratoria, como se ilustra a continuación

### **5.2.1 *Restitución cartográfica***

Esta actividad comprende la compilación de la información cartográfica de la zona de interés para el desarrollo de un proyecto geotérmico. La cartografía es necesaria para realizar los estudios del campo a nivel de detalle. Si la zona no cuenta con esta información es posible que sea necesario adelantar las actividades de toma de fotografías aéreas análogas o digitales y realizar la restitución planimétrica y altimétrica de la zona. Esta información se compila, procesa y trabaja en un Sistema de Información Geográfico.

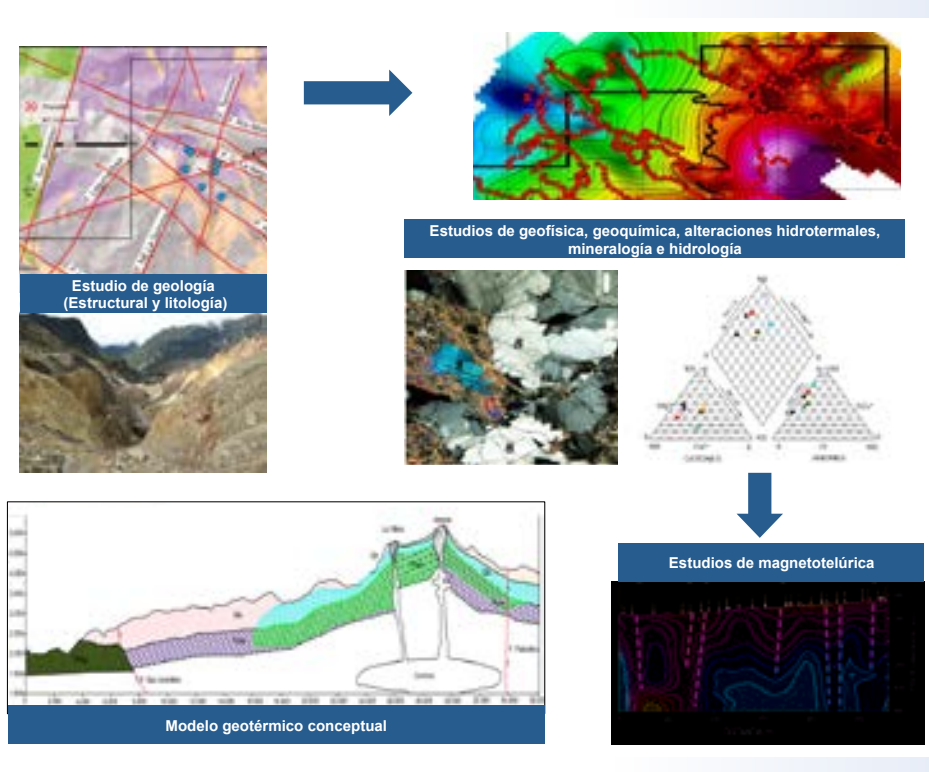
### **5.2.2 *Geología***

El estudio de la litología (composición y origen de las rocas), así como la geomorfología de una zona, permite establecer los procesos geológicos que le han dado origen y su evolución. Una parte importante de estos estudios es la geología estructural, mediante la cual se determinan las estructuras geológicas, es decir, la forma como se encuentran dispuestos los estratos, los depósitos, los cuerpos rocosos, los plegamientos, la localización, tipo, rumbo y buzamiento de las fallas geológicas.

Igualmente se busca identificar y localizar las zonas que han sido afectadas por fluidos geotérmicos y que presentan alteraciones hidrotermales;

Las fallas geológicas revisten gran importancia para la exploración geotérmica, dado que por estas circulan los fluidos geotérmicos hacia la superficie y por medio de ellas también

**Figura 21 Diagrama de flujo de la fase de prefactibilidad<sup>29</sup>**



se recargan los reservorios geotérmicos con aguas freáticas o de infiltración. Un objetivo de una perforación exploratoria es la intersección de las fallas por las cuales circulan fluidos geotérmicos, con el fin de acceder al reservorio.

Los estudios geológicos se realizan mediante la revisión de la información existente de la zona, la fotointerpretación y la ejecución de campañas de reconocimiento en campo con muestreo de rocas, la elaboración de perfiles estratigráficos, análisis mineralógicos y petrográficos de laboratorio. El resultado de todo ese análisis es el mapa geológico detallado de la zona.

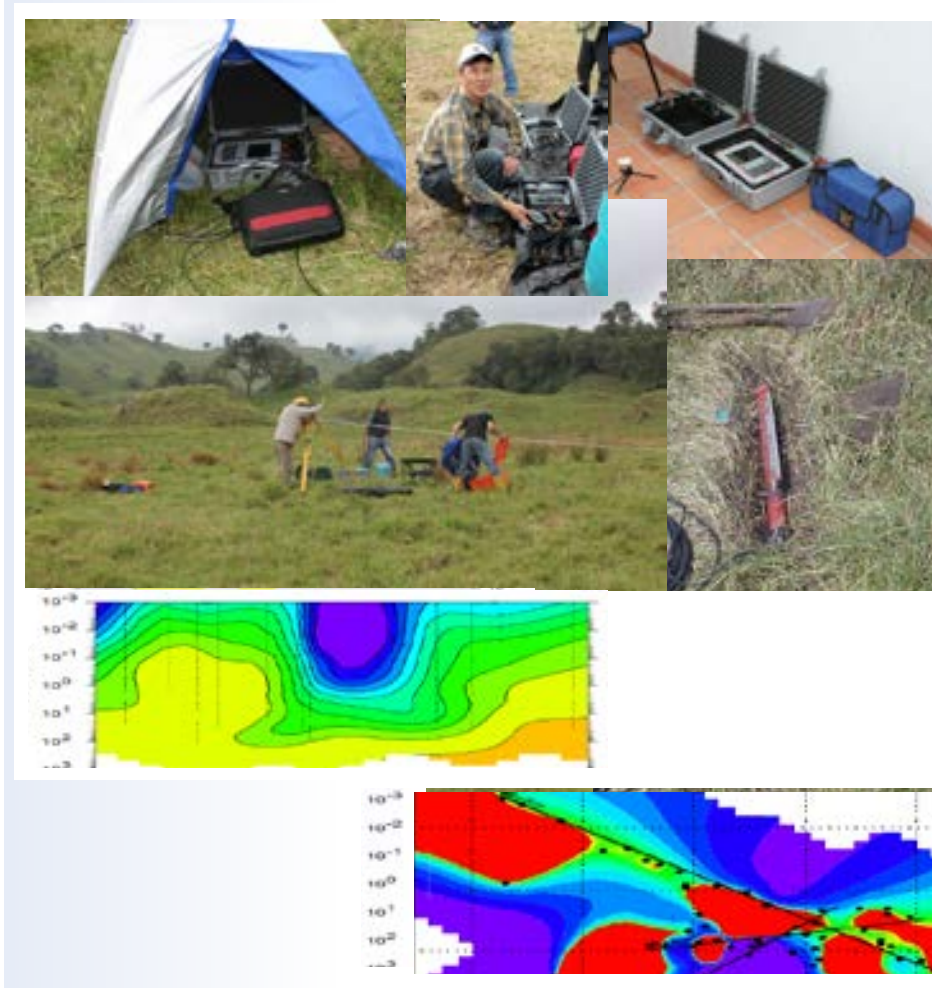
### 5.2.3 Geofísica

Mediante la geofísica se miden una serie de propiedades de las rocas con el fin de establecer, de manera indirecta y desde la superficie, la estructura del subsuelo hasta varios kilómetros

<sup>29</sup> Ver referencia 28.



**Figura 22** Ejemplo de magnetómetros, gravímetros y magnetotelurómetros<sup>30</sup>



de profundidad. El estudio se basa en la medición de anomalías y contraste de las propiedades magnéticas, eléctricas y de densidad que pueden variar con el contenido de agua y la composición de las rocas. Las variables geofísicas que son de interés para la exploración geotérmica son:

<sup>30</sup> Programa Estratégico de Investigación y Modelamiento del Sistema Hidrotermal Magmático. Proyecto de investigación Modelación de la estructura resistiva del subsuelo a partir de sondeos magnetotelúricos, en áreas geotérmicas de Colombia. Caso Nevado del Ruiz. Convenio ISAGEN – BID/JC. Colombia. Cooperación técnica no reembolsable ATN/JC-12150-CO. Estudios de prefactibilidad para el campo geotérmico del Macizo Volcánico del Ruiz. UNAL, CIF, UNAM, SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO, COLCIENCIAS, ISAGEN.



- Gravimetría: se basa en la medición de la variación de la densidad de las rocas
- Magnetometría: se basa en la medición de la variación de la susceptibilidad magnética de las rocas
- Magnetotelúrica: este es un método pasivo que mide las variaciones en la conductividad o resistividad eléctrica de las rocas
- Geoeléctrica (sondeos eléctricos verticales): método activo para medir la variación en la conductividad o resistividad del subsuelo (profundidades menores que la magnetotelúrica)
- Sísmica (pasiva o activa): mide la variación de velocidad de propagación de ondas elásticas en el subsuelo
- Prospección térmica: mide el gradiente o variación de temperatura del subsuelo con respecto de la profundidad

### **Gravimetría y magnetometría**

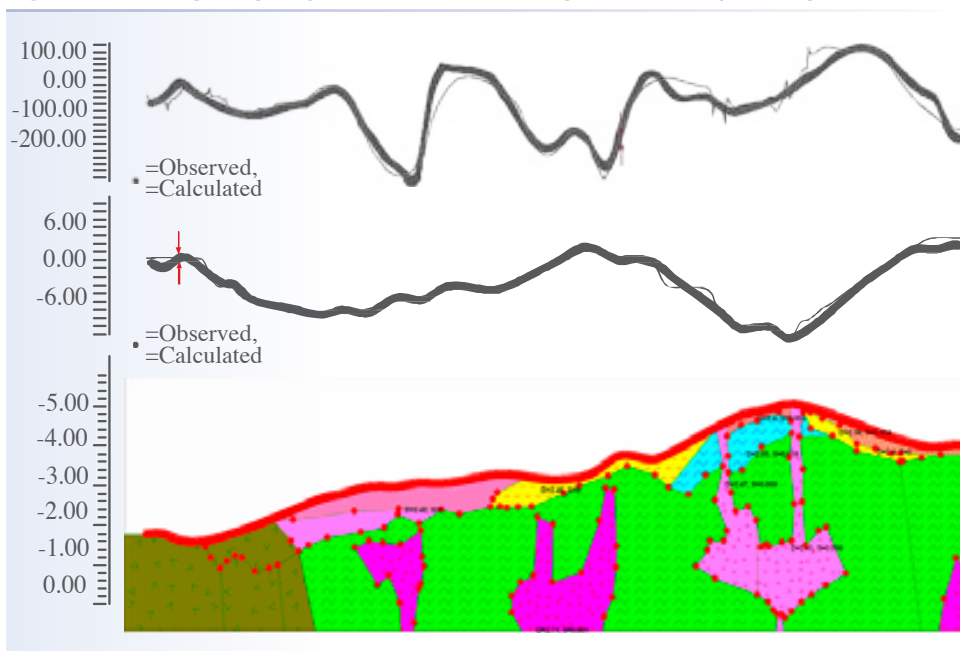
Con estos métodos es posible detectar contrastes en la densidad y la susceptibilidad magnética de las rocas en profundidad. Los resultados pueden ser interpretados para modelar la geometría y la distribución de unidades litológicas y estructuras geológicas del área de estudio. Las variaciones en la densidad y susceptibilidad magnética de las rocas pueden variar con la composición, temperatura y humedad; por tanto es posible relacionar anomalías o variaciones de estos parámetros con la posible presencia de una discontinuidad estructural, una fuente de calor o un reservorio geotérmico.

Los resultados se presentan como anomalías de Bouguer y se localizan en planos que indican la variación lateral de la densidad con relación a una estación base. Un cambio de alta densidad de una manifestación en un medio de baja densidad se considera una anomalía positiva. Las rocas a alta temperatura sufren expansión, con el consiguiente aumento de volumen y la reducción de la densidad, como en el caso de fuentes de calor llamadas calderas.

Por su parte, las variaciones del campo magnético de la tierra están relacionadas con la presencia de concentraciones de material ferromagnético, sin embargo la magnetita es alterada por altas temperaturas. Los ensayos de magnetometría se procesan e interpretan resultando en mapas que indican las variaciones del campo magnético terrestre y se usan para identificar zonas alteradas o anomalías causadas por altas temperaturas.

El siguiente es un ejemplo de un perfil geológico del área del Macizo Volcánico del Ruíz y el modelo geofísico elaborado a partir de la anomalía residual de Bouguer y residual del campo magnético reducido al polo.

**Figura 23** Perfil geológico geofísico de anomalías gravimétricas y de magnetometría<sup>31</sup>



Para este tipo de estudios se utilizan equipos especializados (magnetómetros y gravímetros) que son portátiles y se colocan en zonas aisladas de ruido, tráfico automotor y líneas eléctricas por breves periodos de tiempo, para captar y almacenar las variaciones magnéticas y gravimétricas del subsuelo, después de lo cual los datos son colectados, procesados e interpretados.

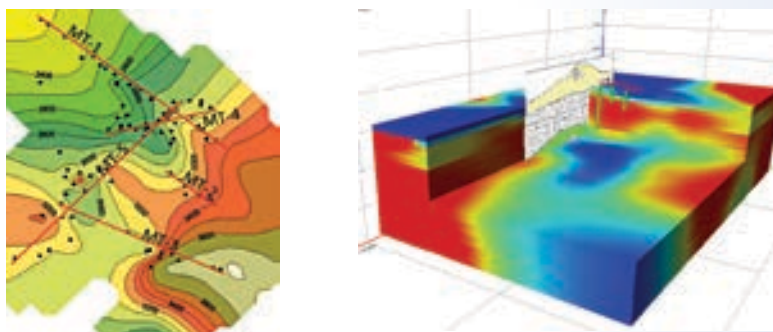
### Magnetotelúrica

Este método utiliza las ondas electromagnéticas generadas por las tormentas solares que llegan a la tierra y viajan por el subsuelo. La técnica tiene múltiples aplicaciones a pesar de que requiere de una sofisticada instrumentación y que es muy sensible a los ruidos de fondo, como líneas y cercas eléctricas.

El método magnetotelúrico se basa en la propiedad de las rocas para permitir el paso de la corriente eléctrica, lo cual depende de su composición mineralógica, presión, temperatura, salinidad y humedad. La resistividad es una medida de la resistencia específica de los materiales al paso de la corriente eléctrica.

<sup>31</sup> Ver referencia 31.

**Figura 24** Ejemplo de un perfil de resistividad mediante técnicas de Magnetotelúrica<sup>32</sup>



El equipo de medición de magnetotelúrica está compuesto por una serie de bobinas receptoras, electrodos y cables. Son equipos multifuncionales de amplio espectro con sensores de audiomagnetotelúrica AMT (1Hz – 10kHz) y sensores de magnetotelúrica MT (1/10.000Hz-400Hz).

Las señales eléctricas y de campos magnéticos generados por las corrientes telúricas de profundidad son analizadas e interpretadas para completar el modelo geotérmico conceptual de las zonas de Interés. Los trabajos son realizados por personal con experiencia y conocimiento en energía geotérmica.

Con esta técnica es posible elaborar modelos bidimensionales o tridimensionales del subsuelo en un área y correlacionar las anomalías o variaciones de la resistividad con la posible presencia de una discontinuidad estructural, una fuente de calor o un reservorio geotérmico. La mayor ventaja del método magnetotelúrico es que puede ser utilizado para definir estructuras hasta 10 kilómetros de profundidad, lo que no es posible lograr con otros métodos.

### Sísmica

La sísmica pasiva permite registrar variaciones en la intensidad y velocidad de viaje de las ondas compresivas y cortantes originadas por microsismos naturales. Se usa para identificar cambios estructurales en el subsuelo. Para la interpretación se parte del supuesto que la velocidad de la onda aumenta con la profundidad, sin embargo a medida que se presentan cambios en la estratigrafía, discontinuidades u obstáculos, la velocidad de propagación de la onda varía.

<sup>32</sup> Ver referencia 31.

Este método se considera útil para determinar las fallas (rumbo y buzamiento) en una zona en la cual éstas se encuentren asociadas con el sistema geotérmico. En los sitios con actividad volcánica activa se presentan abundantes microsismos y un alto nivel de ruido sísmico.

En caso de que no haya microsismicidad es posible emplear la técnica de sismica activa, que consiste en generar las ondas a partir de una fuerza instantánea aplicada en el subsuelo y luego medir la velocidad de llegada de las ondas a la superficie del terreno, donde se instala un receptor.

### **Geoeléctrica**

La geoeléctrica consiste en inyectar una corriente eléctrica al subsuelo en un arreglo de electrodos y medir la diferencia de potencial eléctrico que se produce en otros electrodos receptores. Con este método es posible determinar la resistividad aparente, mediante fórmulas que tienen en cuenta la geometría de colocación de dichos electrodos.

Este método recibe diferentes nombres, tales como Wenner, Schlumberger, dipolo-dipolo, entre otros, dependiendo de la geometría de colocación de los electrodos. Su uso debe considerar las limitaciones de profundidad, pero es ampliamente usado por su bajo costo para la búsqueda de agua subterránea.

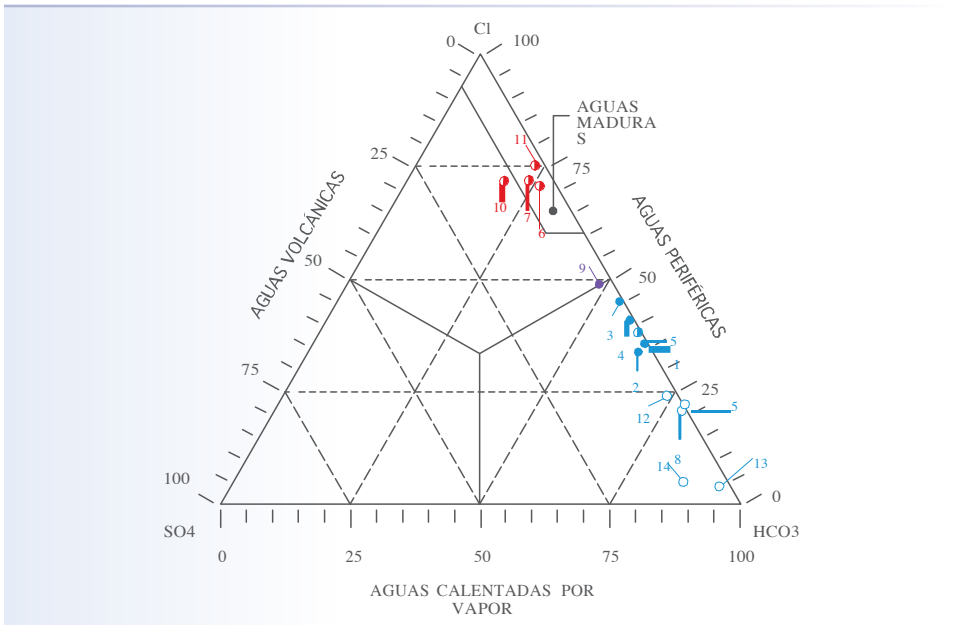
### **Geoquímica**

Los estudios geoquímicos consisten en el muestreo, análisis químico y de isótopos de las manifestaciones geotérmicas, en su fase líquida o gaseosa, que se presentan en la superficie. Es de interés para la geotermia determinar el contenido de: calcio (Ca), sodio (Na), boro (B); cloruros (Cl<sup>-</sup>), hierro total (Fe), magnesio (Mg), potasio (K), silicio (Si), sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>=</sup>), bicarbonatos (CO<sub>3</sub><sup>=</sup>), dióxido de carbono (CO) y otras sustancias de interés.

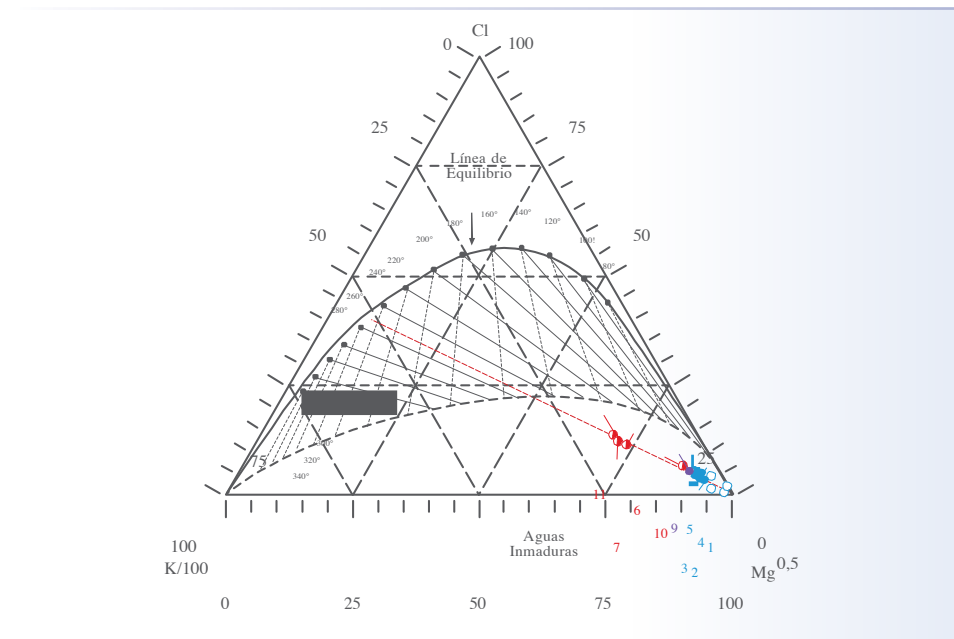
La geoquímica es un medio útil para determinar las propiedades de un sistema geotérmico como temperatura, contenido de vapor o agua, homogeneidad, fuente de recarga y la presencia de gases magmáticos.

El trabajo inicia con el inventario de los manantiales termales y manantiales fríos, la recolección de muestras, el análisis de laboratorio y la interpretación de resultados. Mediante la interpretación de los resultados de la geoquímica y el uso de diagramas que correlacionan los contenidos de algunos cationes y aniones, es posible deducir algunas características de los sistemas geotérmicos tales como: origen, temperatura del

**Figura 25 Diagrama ternario de composición química del agua (aniones)<sup>33</sup>**



**Figura 26 Diagrama ternario de composición química del agua (cationes)<sup>34</sup>**



<sup>33</sup> Ver referencia 31.

<sup>34</sup> Ver referencia 31.

reservorio, grado de madurez, mezcla con aguas superficiales o frías, conexión con el sistema magmático, contenido de vapor, contenido de agua y madurez del reservorio; información de gran valor para la identificación de zonas promisorias para llevar a cabo la perforación exploratoria.

La información sobre el análisis químico de los fluidos geotérmicos también permite identificar potenciales problemas para la etapa de operación del campo y la planta, tales como corrosión e incrustaciones en los ductos y en los equipos de la planta.

### **Hidrogeología**

A partir de la identificación de las unidades litológicas de la zona de interés y sus propiedades, así como de la red hidrográfica, la climatología y la geoquímica, se elabora el estudio de hidrogeología.

Este estudio tiene como fin elaborar el modelo hidrogeológico de la zona de interés, es decir, plantear las hipótesis sobre el funcionamiento general del sistema hidrogeológico, delimitando las zonas de recarga, las direcciones de flujo y la localización de los acuíferos profundos; los cuales pueden estar conectados, alimentar un reservorio geotérmico o por sí mismos constituir uno.

El análisis se realiza mediante la revisión detallada de toda la información geológica y geofísica de la zona de interés y una intensa labor de campo para mapear y describir los manantiales termales, corrientes y depósitos de aguas frías. También se puede utilizar la exploración indirecta del subsuelo mediante la ejecución de sondeos eléctricos verticales que junto con la información química y de algunos isótopos utilizados como trazadores, puede ser útil para establecer el modelo hidrogeológico de la zona.

### **Gradiente térmico**

El gradiente de temperatura se mide en pozos de aproximadamente 10 centímetros de diámetro que pueden variar entre 100 y 600 metros de profundidad. Es un método directo para medir los cambios de la temperatura en profundidad por un periodo de hasta un mes o hasta la estabilización de la temperatura. Es útil para establecer el gradiente térmico, el cual, en condiciones normales, es de 30 °C/kilómetro; valores superiores a éste permiten suponer la existencia de una fuente de calor en profundidad.

Durante la perforación de los pozos de gradiente térmico se hace la recuperación de los núcleos de roca con el fin de realizar ensayos de laboratorio para estimar el coeficiente de

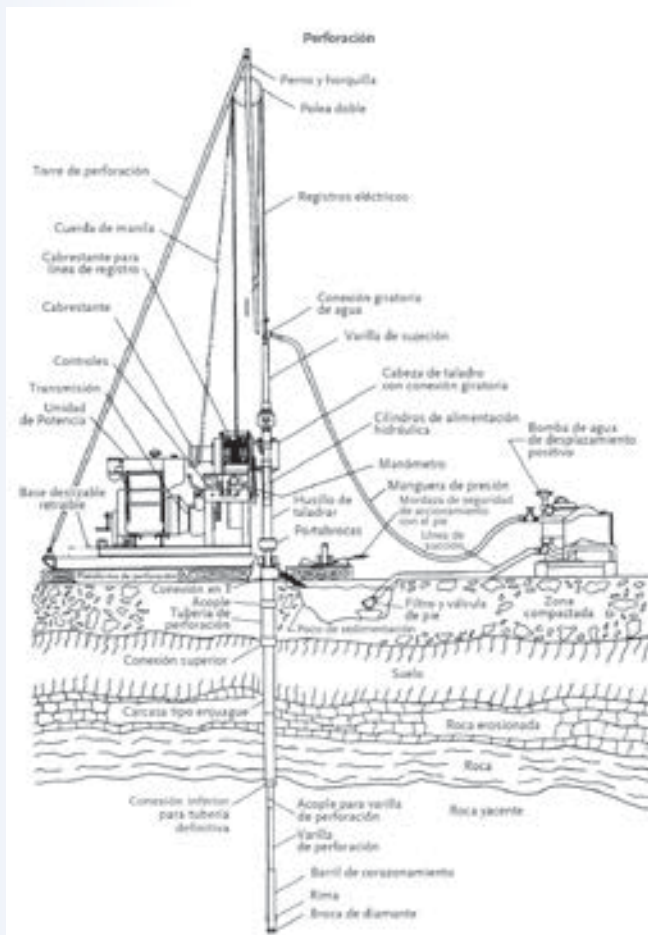
conductividad térmica, el calor específico y la porosidad, con lo cual se estima el flujo de calor o su potencial en términos del flujo de calor ( $W/m^2$ ).

De manera adicional, las muestras de roca se someten a análisis mineralógicos mediante secciones delgadas, análisis de isótopos, radiación e inclusiones fluidas, con el fin de determinar las características de los fluidos geotérmicos que han estado en contacto con las rocas.

En la misma perforación de gradiente térmico se realizan una serie de registros geofísicos, mediante sondas, que complementan la información geológica existente y aportan datos importantes para la elaboración del modelo geotérmico conceptual de la zona de interés, entre ellos:

- **Caliper:** mide la variación del diámetro del pozo en la profundidad y sirve para definir si es posible el uso de las sondas geofísicas al interior del mismo.
- **Rayos gamma:** se mide la respuesta de las paredes del pozo ante la radiación y sirve para identificar capas de arcilla, debido a su radioactividad natural, aunque otras rocas como los shales o rocas ricas en carbonatos y feldespatos, también presentan alta radioactividad natural.
- **Potencial espontáneo:** mide la diferencia de potencial eléctrico entre un electrodo colocado en la superficie del terreno y el potencial natural medido en la profundidad de un pozo. Este ensayo contribuye a detectar capas permeables por la difusión de iones. También se emplea para detectar el nivel freático en el interior de un pozo.
- **Resistividad:** mide la capacidad de la roca para conducir la electricidad con la profundidad. Esta medida sirve para detectar el agua de la formación.
- **Densidad:** mide la cantidad de masa por unidad de volumen de las rocas en la profundidad del pozo, sirve para identificar diferentes capas de roca. Este sondeo se emplea para complementar los estudios de gravimetría que se realizan en la superficie del terreno.
- **Neutrón/Neutrón:** se usa para detectar estratos con alta porosidad y contenido de agua, por su comportamiento ante la radiación.
- **Sónico:** mide la habilidad de las rocas para transmitir ondas sísmicas de compresión en los estratos del pozo. La herramienta emite una onda de sonido desde la fuente a través de la roca y mide el tiempo de regreso al receptor.
- **Presión:** mide la variación de la presión en la profundidad del pozo.
- **Temperatura:** mide la variación de la temperatura en la profundidad del pozo. Normalmente se requiere de varias mediciones hasta que ésta se haya estabilizado. Permite calcular la variación del calor con respecto al tiempo y contribuir con la medición del flujo de calor.

**Figura 27** Equipo de perforación de gradiente térmico y broca para corte de núcleos<sup>35</sup>



Las perforaciones de gradiente térmico se realizan con equipos de perforación portátiles, los cuales son usados comúnmente para recuperación de núcleos y toma de muestras del subsuelo. Para realizar las perforaciones no se requiere construir vías de acceso ya que los equipos de perforación, motores y herramientas se pueden transportar en vehículos de doble tracción o en mulas hasta sitios de difícil acceso. Para la perforación no se realiza intervención de la vegetación de la zona, pues generalmente se hace en zonas con cultivos o potreros y ocupan espacios pequeños.

<sup>35</sup> U.S. Geological Survey Department of the Interior/USGSU.S. Geological Survey. [http://pubs.usgs.gov/twri/twri2-f1/pdf/twri\\_2-F1\\_b.pdf](http://pubs.usgs.gov/twri/twri2-f1/pdf/twri_2-F1_b.pdf).



**Figura 28** Perforación de pozos de gradiente térmico en el macizo Volcánico del Ruiz<sup>36</sup>



Una vez se realizan las mediciones de temperatura del pozo, por un tiempo de un mes, se coloca una válvula para completar el pozo, se limpia el área y se restituye el terreno a su condición original.

<sup>36</sup> Ver referencia 31.

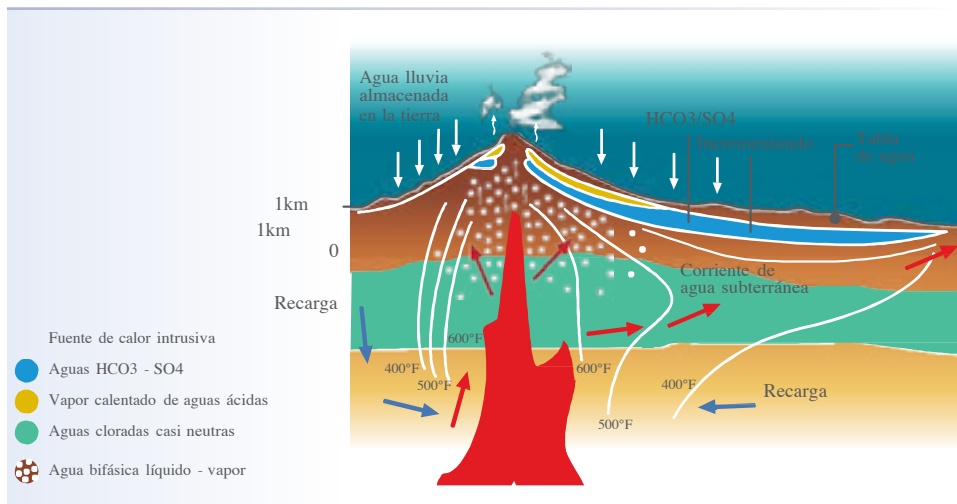
### Modelo geotérmico conceptual y selección de sitios de perforación

Un modelo geotérmico conceptual es la representación esquemática de la estructura y composición geológica de la zona de estudio y subsuelo, de la localización y geometría de la fuente de calor, el reservorio geotérmico, las líneas de flujo de los fluidos y el sistema de recarga del mismo. Este es elaborado por un equipo de expertos en geotermia y con base en la información compilada por las diferentes disciplinas.

Como insumo para la elaboración del modelo geotérmico conceptual se usa la información geológica, geofísica, geoquímica e hidrogeológica; mediante la superposición de los mapas de anomalías (gravimetría, magnetometría y magnetotelúrica), el uso de los Sistemas de Información Geográfica y programas de computador especializados.

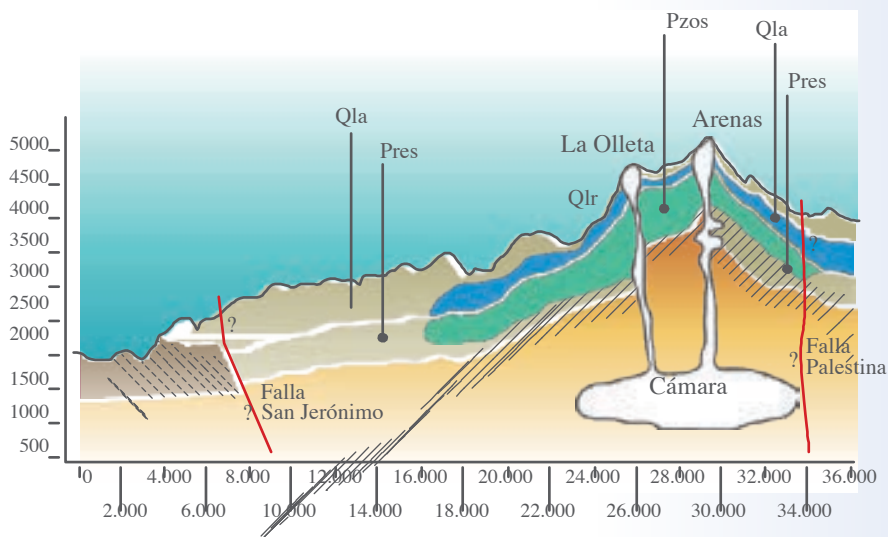
En el modelo geotérmico conceptual se plantea una o varias hipótesis sobre la localización de la fuente de calor, la geometría, la localización del reservorio geotérmico, las líneas de flujo de los fluidos geotérmicos y las fuentes de alimentación de agua.

**Figura 29** Modelo geotérmico teórico de un sistema volcánico<sup>37</sup>

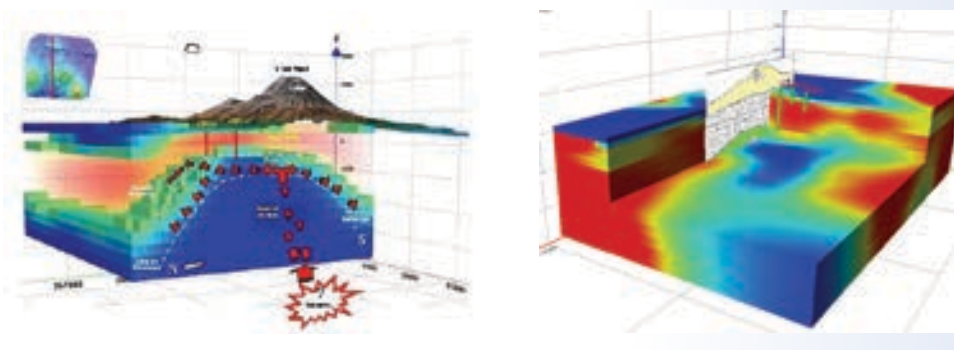


<sup>37</sup> Feasibility Study of Geothermal Power Generation in Colombia Boston Pacific; ISAGEN, USTDA; 2009

**Figura 30** Modelo geotérmico preliminar de un área del Macizo Volcánico del Ruiz<sup>38</sup>



**Figura 31** Modelo geotérmico conceptual del campo de Chinameca El Salvador<sup>39</sup>



Uno de los fines fundamentales de la construcción de un modelo geotérmico conceptual, es obtener elementos que ayuden a reducir la incertidumbre para la selección de los sitios de perforación exploratoria y dar continuidad al desarrollo del proyecto. Para lo anterior se debe dar respuesta a los siguientes interrogantes:

<sup>38</sup> Ver referencia 31.

<sup>39</sup> Geophysical conceptual model of the Chinameca Geothermal Area; Pedro Santos et al; Short Course on Surface Exploration for Geothermal Resources"; UNU-GTP and LaGeo; El Salvador; 17-30 October, 2009. <http://www.os.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-09-15a1.pdf>.

- a. ¿En la zona hay evidencias de fluidos geotérmicos en superficie, tales como: manantiales termales, alteraciones hidrotermales y alto gradiente de temperatura?
- b. ¿En la zona se encuentran, fallas geológicas o intersección de fallas por las cuales puedan circular los fluidos geotérmicos y las aguas de recarga del reservorio?
- c. ¿Existe información sobre la localización, rumbo y buzamiento de las fallas geológicas en profundidad?
- d. ¿La litología de la zona indica la presencia de formaciones geológicas permeables que faciliten el almacenamiento de los fluidos geotérmicos?
- e. ¿Los estudios realizados indican la posibilidad de encontrar fluidos geotérmicos en profundidad con temperaturas adecuadas para generación de energía eléctrica?
- f. ¿Se ha elaborado un modelo conceptual del sistema geotérmico, en el cual se tiene una hipótesis clara sobre la ubicación de la fuente de calor, la localización y geometría del reservorio geotérmico?
- g. ¿Los sitios de localización de las perforaciones exploratorias tienen fácil acceso y requieren inversiones en construcción y adecuación de vías que hagan viable el proyecto?
- h. ¿Los sitios seleccionados para las perforaciones presentan condiciones ambientales, sociales y políticas adecuadas para el desarrollo del campo geotérmico, la construcción de la planta de generación y su conexión al Sistema de Transmisión Nacional?

Las respuestas a estas preguntas deberán dar los elementos de juicio suficientes, al desarrollador para la toma de la decisión de la continuación de las siguientes etapas del proyecto.

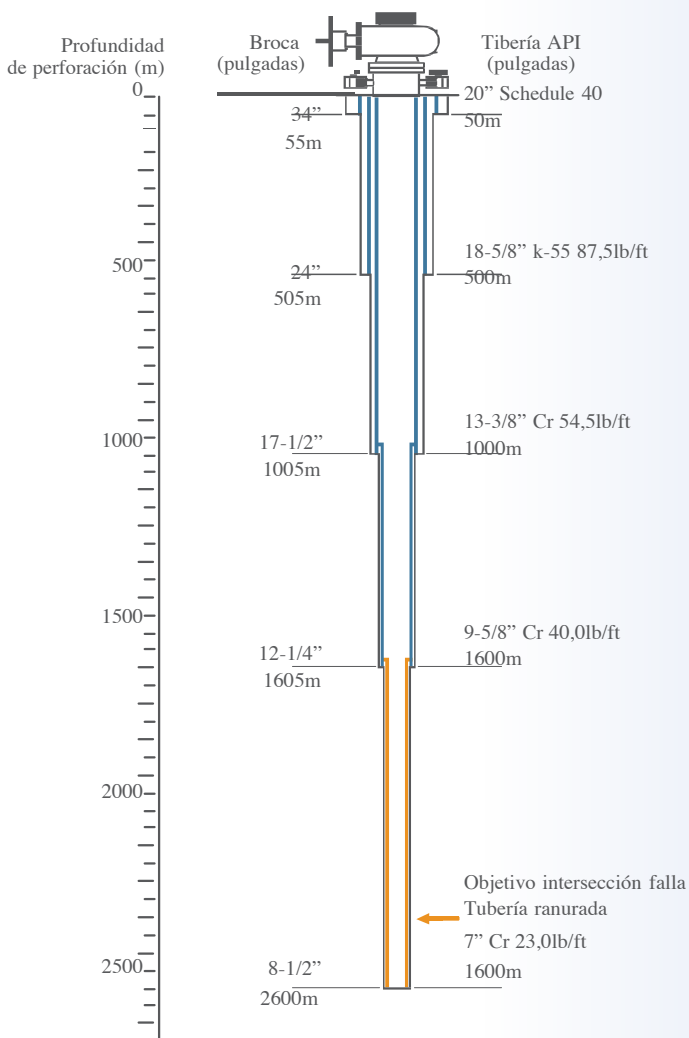
### **5.3. FASE 3. FACTIBILIDAD**

Esta Fase reviste especial importancia, pues las actividades a ejecutar tienen como objetivo principal comprobar la existencia del recurso geotérmico y evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental del desarrollo de un proyecto geotérmico. Se realiza una vez se han comprobado las hipótesis del modelo geotérmico conceptual y las predicciones de los estudios técnicos sobre la localización de la fuente de calor y el reservorio geotérmico.

#### **5.3.1 Perforaciones exploratorias**

La perforación de pozos exploratorios es un medio para comprobar la existencia del recurso geotérmico, su calidad y la cantidad disponible para generación de energía eléctrica. Por lo general estos pozos se perforan a profundidades que pueden variar entre uno (1) y cinco (5) kilómetros, de acuerdo con las características geológicas de la zona.

**Figura 32** Diseño de pozo exploratorio vertical tipo<sup>40</sup>



Generalmente los pozos son telescópicos, es decir, la perforación inicia en diámetros de 20 a 30 pulgadas en la superficie y se reduce gradualmente el diámetro con la profundidad. En la exploración geotérmica existen dos criterios para terminar los pozos. Uno de ellos es terminar el pozo con cuatro pulgadas, que corresponde a un diámetro estrecho que sirve solamente para la exploración. Otro criterio es instalar un diámetro que permita la

<sup>40</sup> Ver referencia 28.

**Figura 33** Equipos de perforación exploratoria<sup>41</sup>



producción futura de energía, en este caso el diámetro en profundidad debe ser igual o superior a ocho pulgadas.

Los costos del pozo varían con la profundidad y el diámetro, por tanto afectan la viabilidad financiera de los proyectos. La decisión sobre la profundidad máxima de exploración y el diámetro del pozo depende en gran medida de la información disponible y del nivel de riesgo que la empresa desarrolladora del proyecto esté dispuesta a asumir.

Se pueden utilizar diferentes técnicas de perforación con brocas tricónicas, perforaciones coronadas, perforaciones con aire a alta presión y perforaciones verticales o direccionales, esta última técnica se usa cuando se quiere acceder a varios puntos del reservorio desde un mismo sitio en superficie o interceptar una falla o una formación geológica específica. El uso de una u otra técnica depende de la disponibilidad de equipos, el tipo de roca a perforar y su costo.

Las actividades de perforación exploratoria se deben hacer de manera paralela con la ejecución del Plan de Manejo Ambiental para perforación exploratoria, aprobado por la autoridad ambiental competente.

<sup>41</sup> Tomado de U.S. Geological Survey Department of the Interior/USGSU.S. Geological Survey. [http://gallery.usgs.gov/images/01\\_21\\_2011/gKbn1QP118\\_01\\_21\\_2011/large/Energy\\_Trip\\_058\\_2.jpg](http://gallery.usgs.gov/images/01_21_2011/gKbn1QP118_01_21_2011/large/Energy_Trip_058_2.jpg) y Chemical stimulation applied in geothermal fields, El Salvador years 2000–2010. Luz A. Barrios, Reservoir Engineering Area. [lbarrios@lageo.com.sv](mailto:lbarrios@lageo.com.sv).

### **5.3.2 Evaluación del yacimiento**

Los pozos de exploración proporcionan información geológica y geofísica, mediante la cual es posible comprobar las hipótesis y los supuestos del modelo geotérmico conceptual, los estudios técnicos y exploraciones de superficie. El muestreo y análisis de los fluidos geotérmicos del pozo y el análisis de las muestras de rocas de la perforación permiten determinar las características químicas de los fluidos y la conductividad hidráulica.

Una vez perforado el pozo, se instalan tuberías y válvulas de cabeza de pozo para realizar pruebas de producción con el fin de determinar las reservas, la capacidad de sostener la producción por largos periodos de tiempo, los requerimientos de reinyección de fluidos y potencial productividad del pozo, en términos del flujo de masa y de entalpía para producción de energía.

Se requieren varios pozos para poder determinar el tamaño del reservorio y su capacidad de producción de fluidos geotérmicos. Los expertos y la literatura reportan una probabilidad de éxito del 25%, lo que quiere decir que de cuatro pozos exploratorios perforados solo uno resulta positivo. La perforación exploratoria conlleva una alta incertidumbre y de su éxito depende la continuidad de un proyecto geotérmico.

La información colectada de los pozos que resulten con permeabilidad y temperaturas adecuadas debe conllevar a la simulación numérica del campo, esta permite determinar el potencial energético del campo y la viabilidad de su aprovechamiento.

### **5.3.3 Evaluación de viabilidad técnica y económica**

Una vez se ha determinado la existencia y calidad del recurso geotérmico se realiza una evaluación técnica sobre la capacidad y tipo de planta a instalar, el sitio para la localización de la planta, el número y la localización de los pozos de producción y reinyección, así como de las facilidades requeridas, vías, líneas de conducción y equipo electromecánico. Tipo de planta o tecnología a utilizar, configuración y número de unidades, equipos principales y de balance de planta, capacidad a instalar; rangos de presión y temperatura de flujo, requerimientos de transformación y transmisión eléctrica.

El diseño básico de la planta y del campo, permitirá obtener el cronograma y presupuesto estimado del proyecto, lo cual será la base para realizar las evaluaciones financieras de viabilidad del proyecto. Para este análisis se deben tener en cuenta las siguientes variables.



### 5.3.4 Diseño de la planta y planeación del desarrollo del campo

Como su nombre lo indica, la factibilidad le da vía libre al proyecto, por tanto comprobada la viabilidad técnica, económica y ambiental del proyecto, se da paso a las actividades de diseño y planeación del desarrollo del campo, que incluyen las siguientes acciones:

- a. Localización y diseño de pozos de producción y reinyección;
- b. Diseño de líneas de conducción de fluidos;
- c. Diseño de vías de acceso y obras civiles;
- d. Diseño de la línea de conexión al Sistema Interconectado Nacional;
- e. Diseño de la planta, equipos y sistemas auxiliares;
- f. Elaboración de especificaciones técnicas;
- g. Elaboración de los Documentos de Referencia para contratar la construcción y el suministro de equipos;
- h. Estructuración y cierre financiero.

**Tabla 8 Variables de interés para el desarrollo de una planta de generación geotermia<sup>42</sup>:**

Variable	Nota
Tipo de fluido geotérmico (vapor o agua caliente):	Es deseable tener vapor seco, es decir, agua en fase gaseosa, pero esto solo se logra en fluidos de alta entalpía. Generalmente los pozos producen una mezcla de agua o vapor, o con dominancia de alguna de las dos fases y la otra accesoria, dependiendo de la temperatura del reservorio.
Temperatura del fluido geotérmico.	Es deseable tener fluidos de alta entalpía (>200 °C) la temperatura de los fluidos define el tipo de tecnología de generación a usar (flash o binaria) y el tipo de turbina (una etapa, multietapa), etc.
Producción esperada del yacimiento.	Cantidad de fluidos o flujo másico de los fluidos que se puede obtener del campo para producción de energía eléctrica.
Vías de acceso y obras asociadas requeridas.	Para el desarrollo del campo y la planta de generación se requiere la construcción de vías de acceso y línea de conexión, entre otras obras civiles menores. Sin embargo cuando el campo se encuentra muy lejos de vías existentes o al Sistema Interconectado Nacional, los costos asociados a su adecuación podrían hacer inviable el proyecto.
Pozos de producción y reinyección requeridos (número y profundidad).	La profundidad y número de pozos de producción y reinyección requeridos para la producción del fluido geotérmico, y la reinyección de los fluidos que salen de la planta, pueden aumentar los costos de desarrollo del campo y por tanto, afectar financieramente el proyecto. Por esto se requiere un análisis detallado del desarrollo del campo, los costos asociados y la producción de fluidos geotérmicos esperados.



(continued)

**Tabla 8 Variables de interés para el desarrollo de una planta de generación geotermia<sup>42</sup>:**

Variable	Nota
Tipo de planta, número de unidades y capacidad a instalar.	Se refiere a la tecnología a usar. Generalmente se usan plantas flash para fluidos de alta entalpía y binaria para fluidos de baja entalpía. La tecnología flash requiere instalaciones más pequeñas, menos equipos y por tanto, sus costos de instalación y operación son más bajos que los de la tecnología binaria. De acuerdo con las características del campo, su distribución y la producción de fluidos geotérmicos, es posible transportar el vapor e instalar una sola unidad de generación o varias unidades de menor capacidad, directamente en boca de pozo; sin embargo cada disposición afecta de manera diferente los costos de inversión y operación, y por tanto, la viabilidad financiera del proyecto.
Factor de capacidad y producción de energía.	Este factor corresponde a la relación entre la energía realmente producida en un año por una planta y la energía que produciría la misma suponiendo una generación continua. Para la geotermia es posible lograr un factor de planta superior al 90%.
Eficiencia	<p>La eficiencia en la conversión de energía en una planta geotérmica está dada por la siguiente ecuación:</p> $n = W/mx E$ <p>Donde: <b>W</b>: Potencia eléctrica entregada a la red; <b>m</b>: flujo másico total del fluido geotérmico; <b>E</b>: Energía específica del fluido geotérmico en el yacimiento.</p> $E = h P_1 T_1 - P_0 T_0 - T_0 (s P_1 T_1 - s (P_0 T_0))$ <p>Donde: <b>h</b>: Entalpía específica en el yacimiento; <b>s</b>: Entropía en el yacimiento; <math>P_1</math>: presión en estado estacionario (en el yacimiento); <math>T_1</math>: temperatura en estado estacionario (en el yacimiento); <math>P_0</math>: presión en la planta; <math>T_0</math>: temperatura en la planta.</p>
Costos	Estas variables hacen relación a todos los costos requeridos para el desarrollo del proyecto, incluidos los estudios de prefactibilidad y factibilidad (perforación exploratoria), el desarrollo del campo, la construcción y montaje de la planta, así como los costos de operación y ambientales asociados a cada fase.
Análisis de mercado y cálculo de ingresos.	Para el análisis de viabilidad de este tipo de proyectos, así como para cualquier otro de generación de energía eléctrica, se requiere establecer el marco regulatorio y variables macroeconómicas de análisis, para un posterior análisis del mercado de venta de energía eléctrica e ingresos de la planta.

<sup>42</sup> Ver referencia 28.

## 5.4. FASE 4. CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN

Las siguientes fases del desarrollo de un proyecto geotérmico son similares a las de otros proyectos energéticos o de infraestructura. Sin embargo es necesario tener en cuenta que los campos geotérmicos son dinámicos y por consiguiente, se requiere un seguimiento detallado del mismo durante su operación, sobre los siguientes aspectos de importancia:

- a. Variaciones de temperatura y presión de los fluidos geotérmicos;
- b. Variaciones en los contenido de agua y vapor de los fluidos geotérmicos;
- c. Variaciones de la composición química de los fluidos geotérmicos;
- d. Incrustaciones y obstrucción de los pozos de producción o reinyección;
- e. Reinyección y manejo de fluidos geotérmicos y salmueras.

Se requiere un continuo monitoreo y evaluación del yacimiento con el fin de tomar las medidas necesarias sobre la reinyección de fluidos o la sobreexplotación del campo que puede llevar a su declinación, para este propósito se involucran profesionales en las áreas de geología, geofísica y geoquímica para la operación del campo y la planta.

**Figura 34** Planta Geotérmica de Berlín El Salvador<sup>43</sup>



<sup>43</sup> Ver Referencia 16.

# PERMISOS, CONCESIONES, LICENCIAS Y ESTUDIOS AMBIENTALES

## 6

En Colombia la geotermia se encuentra catalogada como un recurso natural renovable, cuya propiedad y administración es competencia del Estado. La anterior afirmación se sustenta en las siguientes disposiciones normativas:

### **Clase de recurso y propiedad:**

El Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente (Decreto – Ley 2811 de 1974), señala al respecto lo siguiente:

- Artículo 3, literal g: Los recursos geotérmicos son considerados como un recurso natural renovable y por lo tanto, objeto de regulación de dicho Código.
- Artículo 42: Pertenecen a la Nación los recursos naturales renovables.
- Artículo 167: Son recursos energéticos primarios:
  - a. La energía solar;
  - b. La energía eólica;
  - c. Las pendientes, desniveles topográficos o caídas;
  - d. Los recursos geotérmicos;
  - e. La energía contenida en el mar.
- Artículo 174: Sin perjuicio de derechos adquiridos, la Nación se reserva el dominio de los recursos geotérmicos.

### **Definición y uso del recurso:**

El Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente define el recurso geotérmico así:

- Artículo 172: Para los efectos de este Código, se entiende por recursos geotérmicos:
  - a. La combinación natural del agua con una fuente calórica endógena subterránea cuyo resultado es la producción espontánea de aguas calientes o de vapores, y
  - b. La existencia de fuentes calóricas endógenas subterráneas a las cuales sea posible inyectar agua para producir su calentamiento, o para generar vapor.
- Artículo 173: También son recursos geotérmicos, a que se aplican las disposiciones de este Código y las demás legales, los 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.

Los recursos geotérmicos que no alcancen los 80 grados centígrados de temperatura mínima serán considerados como aguas termales.

Adicionalmente, el Código indica los siguientes posibles usos del recurso geotérmico:

- Artículo 175. Los recursos geotérmicos pueden tener entre otros, los siguientes usos:
  - a. Producción de energía;
  - b. Producción de calor directo para fines industriales, o de refrigeración o calefacción;
  - c. Producción de agua dulce;
  - d. Extracción de su contenido mineral

### **Gestión del recurso:**

Teniendo en cuenta que el recurso geotérmico es de propiedad de la Nación, su administración debe asignarse a alguna entidad gubernamental. Es así como la Ley 99 de 1993 “por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones” dispone al respecto lo siguiente:

- Artículo 2. Crea el Ministerio de Ambiente “como organismo rector de la gestión del medio ambiente y de los recursos naturales renovables, encargado de impulsar una relación de respeto y armonía del hombre con la naturaleza y de definir, en los términos de la presente ley, las políticas y regulaciones a las que se sujetarán la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento de los recursos naturales renovables y el medio ambiente de la Nación, a fin de asegurar el desarrollo sostenible.”
- Artículo 6. Establece una cláusula general de competencia, en la cual se indica que el Ministerio de Ambiente ejercerá, en lo relacionado con el medio ambiente y los recursos naturales renovables, las funciones que no hayan sido expresamente atribuidas por la Ley a otra autoridad.

Teniendo en cuenta que la geotermia es un recurso natural renovable a cargo de la Nación, se puede concluir a partir de las normas citadas que su gestión está en cabeza del Ministerio de Ambiente<sup>44</sup>.

De otra parte, el uso y aprovechamiento del recurso geotérmico requiere de la obtención de permisos, concesiones y licencias ambientales, los cuales estarán a cargo de otras autoridades ambientales, según corresponda, como lo son las Corporaciones Autónomas Regionales.

---

<sup>44</sup> Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Decreto Ley 28 de 1974 y decretos reglamentarios.

## 6.1. Permiso de estudio

Es importante mencionar que la geotermia requiere de un gran esfuerzo para realizar las fases iniciales de exploración (reconocimiento, prefactibilidad y factibilidad) de manera previa a la fase de desarrollo del campo y la planta (construcción y operación). En estas fases previas se invierten grandes cantidades de recursos a riesgo, por lo que el desarrollador solo estaría dispuesto a realizar tales inversiones si se le brinda seguridad jurídica para el acceso al recurso, en caso de resultar positiva la fase de exploración.

De acuerdo con lo anterior, se considera importante iniciar la exploración geotérmica con la solicitud de Permiso de Estudio, de acuerdo con las siguientes normas del Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente (Decreto – Ley 2811 de 1974):

- Artículo 56. Podrá otorgarse permiso para el estudio de recursos naturales cuyo propósito sea proyectar obras o trabajos para su futuro aprovechamiento. El permiso podrá versar, incluso sobre bienes de uso ya concedido, en cuanto se trate de otro distinto del que pretenda hacer quien lo solicita y siempre que los estudios no perturben el uso ya concedido.
- Estos permisos podrán tener duración hasta de dos años, según la índole de los estudios.
- Los titulares tendrán prioridad sobre otros solicitantes de concesión, mientras esté vigente el permiso de estudio y, así mismo tendrán exclusividad para hacer los estudios mientras dure el permiso.
- El término de estos permisos podrá ser prorrogado cuando la inejecución de los estudios dentro del lapso de vigencia del permiso, obedezca a fuerza mayor.
- Artículo 57. Los titulares de los permisos a que se refiere el artículo anterior podrán tomar muestras de los recursos naturales sobre los cuales verse el permiso, en la cantidad indispensable para sus estudios, pero sin que puedan comerciar en ninguna forma con las muestras tomadas.
- Se exigirá siempre la entrega a la autoridad competente de una muestra igual a la obtenida. Si la muestra fuere única, una vez estudiada y dentro de un lapso razonable, deberá entregarse a dicha autoridad.
- La transgresión de esta norma se sancionará con la revocación inmediata del permiso.
- Artículo 58. Mientras se encuentre vigente un permiso de estudios no podrá concederse otro de la misma naturaleza, a menos que se refiera a aplicaciones o utilidades distintas de las que pretenda el titular, ni otorgarse a terceros el uso del recurso materia del permiso.

Es importante tener en cuenta que este permiso tiene una duración corta, considerando que los dos (2) años especificados en la norma podrían ser insuficientes para la exploración geotérmica, que en conjunto (prefactibilidad y factibilidad) tomaría hasta cinco (5) años. La expedición de este permiso podría incluir algunas obligaciones de inversión en exploración, el cumplimiento del cronograma de actividades propuesto y la renovación del mismo por una o dos veces con el fin de cubrir las fases de prefactibilidad y factibilidad, si el peticionario ha dado cumplimiento a las obligaciones de inversión y ejecución del cronograma respectivo.

## 6.2. Concesiones

Por ser la geotermia un recurso de propiedad de la Nación y administrado por la autoridad ambiental competente, este es objeto de concesión para su uso y aprovechamiento, como lo establecen las siguientes normas:

- Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente (Decreto – Ley 2811 de 1974):
  - Artículo 170. Las personas naturales o jurídicas, públicas o privadas, que deseen generar energía hidráulica, cinética o eléctrica, deberán solicitar concesión o proponer asociación.

Para la concesión o la asociación se deberán tener en cuenta los indispensables factores de índole ecológica, económica y social.
  - Artículo 176. La concesión de uso de aguas para explotar una fuente geotérmica será otorgada con la concesión del recurso geotérmico.
  - Artículo 177. Serán de cargo del concesionario de recursos geotérmicos de contenido salino las medidas necesarias para eliminar efectos contaminantes de las aguas o los vapores condensados.
- Decreto 1541 de 1978. Reglamentario del Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente
- Artículo 36 literal h: Toda persona natural o jurídica, pública o privada, requiere concesión para obtener el derecho al aprovechamiento de las aguas para los siguientes fines:
  - a. Abastecimiento en los casos que requiera derivación;
  - b. Riego y silvicultura;
  - c. Abastecimiento de abrevaderos cuando se requiera de derivación;
  - d. Uso industrial;
  - e. Generación térmica o nuclear de electricidad;
  - f. Explotación minera y tratamiento de minerales;

- g. Explotación petrolera;
- h. Inyección para generación geotérmica;
- i. Generación hidroeléctrica;
- j. Generación cinética directa;
- k. Flotación de madera;
- l. Transporte de minerales y sustancias tóxicas;
- m. Agricultura y pesca;
- n. Recreación y deportes;
- o. Usos medicinales, y
- p. Otros usos similares

### 6.3. Licencia ambiental

La regulación Colombiana sobre la materia establece la obligatoriedad del trámite y obtención de la licencia ambiental para todos aquellos proyectos obras o actividades que de acuerdo con la ley y los reglamentos, pueda producir deterioro grave a los recursos naturales renovables o al medio ambiente o introducir modificaciones considerables o notorias al paisaje.

Aunque este no es el caso de la geotermia, ya que la misma ha sido considerada, en todo el mundo como una tecnología limpia y renovable, que por el contrario constituye una alternativa, ambientalmente viable, para el suministro de energía más limpia, es claro que la misma tiene algunas particularidades que implican el diseño y aplicación de medidas de manejo ambiental en todas sus fases.

Las siguientes normas de carácter general, establecen la competencia de la autoridad ambiental y la obligación, por parte de los desarrolladores de proyectos, de realizar el trámite para la obtención de la Licencia Ambiental, como sigue:

- Ley 99 de 1993. Por la cual se crea del Ministerio del Medio Ambiente y se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA).
- Artículo 49. DE LA OBLIGATORIEDAD DE LA LICENCIA AMBIENTAL. La ejecución de obras, el establecimiento de industrias o el desarrollo de cualquier actividad, que de acuerdo con la Ley y los reglamentos, pueda producir deterioro grave a los recursos naturales renovables o al medio ambiente o introducir modificaciones considerables o notorias al paisaje requerirán de una Licencia Ambiental.

- Artículo 50. DE LA LICENCIA AMBIENTAL. Se entiende por Licencia Ambiental la autorización que otorga la autoridad ambiental competente para la ejecución de una obra o actividad, sujeta al cumplimiento por el beneficiario de la licencia de los requisitos que la misma establezca en relación con la prevención, mitigación, corrección, compensación y manejo de los efectos ambientales de la obra o actividad autorizada.
- Artículo 51. COMPETENCIA. Las Licencias Ambientales serán otorgadas por el Ministerio del Medio Ambiente, las Corporaciones Autónomas Regionales y algunos municipios y distritos, de conformidad con lo previsto en esta Ley.
- En la expedición de las licencias ambientales y para el otorgamiento de los permisos, concesiones y autorizaciones se acatarán las disposiciones relativas al medio ambiente y al control, la preservación y la defensa del patrimonio ecológico, expedidas por las entidades territoriales de la jurisdicción respectiva.
- Artículo 53. DE LA FACULTAD DE LAS CORPORACIONES AUTÓNOMAS REGIONALES PARA OTORGAR LICENCIAS AMBIENTALES. El Gobierno Nacional por medio de reglamento establecerá los casos en que las Corporaciones Autónomas Regionales otorgarán Licencias Ambientales y aquellos en que se requiera Estudio de Impacto Ambiental y Diagnóstico Ambiental de Alternativas.
- Decreto 2820 de 2010. Reglamentario del Título VIII de la Ley 99 de 1993, sobre licencias ambientales.
  - Artículo 8, numeral 4. Competencia del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible). El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, otorgará o negará de manera privativa la licencia ambiental para los siguientes proyectos, obras o actividades:
    - 4. En el sector eléctrico:
      - a. La construcción y operación de Centrales generadoras de energía eléctrica con capacidad instalada igual o superior a 100 MW;
      - b. Los proyectos de exploración y uso de fuentes de energía alternativa virtualmente contaminantes con capacidad instalada superior a 3MW;
      - c. El tendido de las líneas de transmisión del sistema nacional de interconexión eléctrica, compuesto por el conjunto de líneas con sus correspondientes módulos de conexión (subestaciones) que se proyecte operen a tensiones iguales o superiores a 220 KV.
- Decreto 3573 de 2011. Por el cual se crea la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) y se dictan otras disposiciones.
  - Artículo 3. FUNCIONES. La Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) cumplirá, las siguientes funciones:



1. Otorgar o negar las licencias, permisos y trámites ambientales de competencia del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, de conformidad con la ley y los reglamentos.
  2. Realizar el seguimiento de las licencias, permisos y trámites ambientales.
  3. Administrar el Sistema de Licencias, Permisos y Trámites Ambientales (SILA) y Ventanilla Integral de Trámites Ambientales en Línea (Vital).
  4. Velar porque se surtan los mecanismos de participación ciudadana de que trata la ley relativos a licencias, permisos y trámites ambientales.
  5. Implementar estrategias dirigidas al cuidado, custodia y correcto manejo de la información de los expedientes de licencias, permisos y trámites ambientales.
  6. Apoyar la elaboración de la reglamentación en materia ambiental.
  7. Adelantar y culminar el procedimiento de investigación, preventivo y sancionatorio en materia ambiental, de acuerdo con lo dispuesto en la Ley 1333 de 2009 o la norma que la modifique o sustituya.
  8. Adelantar los cobros coactivos de las sumas que le sean adeudadas a la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) por todos los conceptos que procedan.
  9. Ordenar la suspensión de los trabajos o actividades, en los casos en los que el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible haga uso del ejercicio discrecional y selectivo sobre los asuntos asignados a las Corporaciones Autónomas Regionales.
  10. Aprobar los actos administrativos de licencias ambientales para explotaciones mineras y de construcción de infraestructura vial y los permisos y concesiones de aprovechamiento forestal de que tratan los artículos 34, 35 y 39 de la Ley 99 de 1993.
  11. Dirimir los conflictos de competencia cuando el proyecto, obra o actividad sujeto a licencia o permiso ambiental se desarrolle en jurisdicción de dos o más autoridades ambientales.
  12. Desarrollar la política de gestión de información requerida para el cumplimiento de su objeto.
  13. Asumir la representación judicial y extrajudicial de la Nación en los asuntos de su competencia.
  14. Las demás funciones que le asigne la ley.
- Como complemento a estas disposiciones es importante anotar que el artículo 3 del Decreto 2820 de 2010, por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales, establece lo siguiente:

*“... La Licencia Ambiental llevará implícitos todos los permisos, autorizaciones y/o concesiones para el uso, aprovechamiento y/o afectación de los recursos naturales renovables, que sean necesarios por el tiempo de vida útil del proyecto, obra o actividad.*

*El uso aprovechamiento y/o afectación de los recursos naturales renovables, deberán ser claramente identificados en el respectivo Estudio de Impacto Ambiental.*

*La Licencia Ambiental deberá obtenerse previamente a la iniciación del proyecto, obra o actividad. Ningún proyecto, obra o actividad requerirá más de una Licencia Ambiental.”*

De acuerdo con lo anterior, la Autoridad Ambiental es la encargada de otorgar el permiso de estudio y la licencia ambiental para exploración y uso, en la cual se deberá incorporar la concesión para el uso del recurso geotérmico y el agua.

## **6.4. Estudios ambientales**

### **6.4.1 Diagnóstico Ambiental de Alternativas (DAA)**

El Diagnóstico Ambiental de Alternativas (DAA) es requerido para la mayoría de proyectos de generación de energía e infraestructura, este se elabora de manera previa a la realización del Estudio de Impacto Ambiental (EIA), previa solicitud a la autoridad ambiental, de acuerdo con lo establecido en las siguientes normas:

- Decreto 2820 de 2010.
  - Artículo 17. Objeto del Diagnóstico Ambiental de Alternativas. El Diagnóstico Ambiental de Alternativas (DAA) tiene como objeto suministrar la información para evaluar y comparar las diferentes opciones que presente el peticionario, bajo las cuales sea posible desarrollar un proyecto, obra o actividad. Las diferentes opciones deberán tener en cuenta el entorno geográfico, las características bióticas, abióticas y socioeconómicas, el análisis comparativo de los efectos y riesgos inherentes a la obra o actividad; así como las posibles soluciones y medidas de control y mitigación para cada una de las alternativas.
  - Lo anterior con el fin de aportar los elementos requeridos para seleccionar la alternativa o alternativas que permitan optimizar y racionalizar el uso de recursos y evitar o minimizar los riesgos, efectos e impactos negativos que puedan generarse.
  - Artículo 18. Exigibilidad del Diagnóstico Ambiental de Alternativas. Los interesados en los proyectos, obras o actividades que se describen a continuación deberán solicitar

pronunciamento a la autoridad ambiental competente sobre la necesidad de presentar el Diagnóstico Ambiental de Alternativas DAA:

(...)

6. La construcción y operación de centrales generadoras de energía eléctrica;
7. Los proyectos de exploración y uso de fuentes de energía alternativa virtualmente contaminantes con capacidad instalada superior a 3 MW;

En cuanto a la realización del Diagnóstico Ambiental de Alternativas (DAA) para el aprovechamiento y uso del recurso geotérmico, para la generación de energía eléctrica, se observa que no obstante se debe solicitar a la Autoridad Ambiental su pronunciamento, en la práctica es difícil contar con alternativas para su desarrollo por las siguientes razones:

- La localización del campo y la planta dependen única y exclusivamente de la localización del reservorio geotérmico, su geometría y profundidad, lo cual solo se conoce al final de la fase de factibilidad.
- El diseño de la planta, la tecnología a usar y la capacidad a instalar depende única y exclusivamente de la calidad y cantidad del recurso geotérmico que se encuentre en la fase de factibilidad.

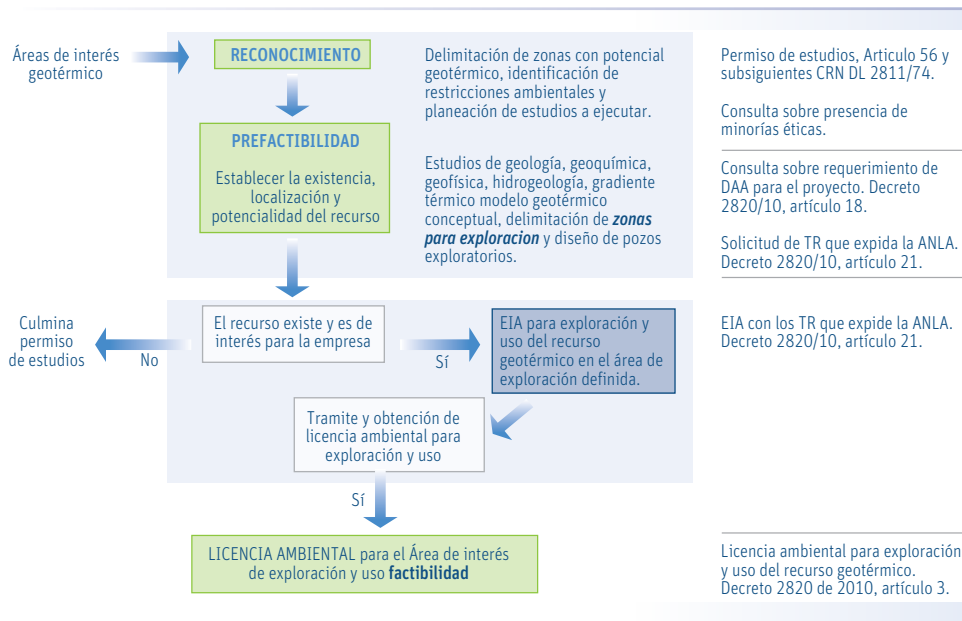
Por lo anterior, no es posible realizar una evaluación técnica y ambiental de las alternativas de localización y tecnología para el uso y aprovechamiento del recurso, pues éste es el resultado de la labor de exploración, una vez se ha determinado la localización del recurso y la calidad del mismo.

#### **6.4.2 Estudio de impacto ambiental (EIA)**

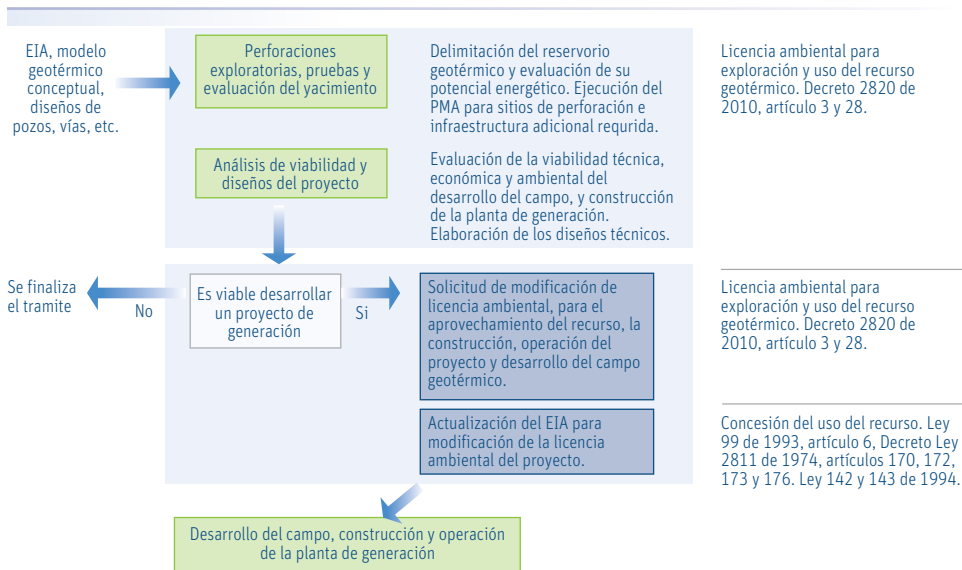
Este estudio, de acuerdo con el artículo 21 del Decreto 2820 de 2010, es el instrumento básico para la toma de decisiones sobre los proyectos, obras o actividades que requieren licencia ambiental. Este estudio debe ser elaborado de conformidad con la Metodología General para la Presentación de Estudios Ambientales y los términos de referencia expedidos para el efecto.

Para el trámite de la licencia y la elaboración y presentación de los Estudios Ambientales para el uso y aprovechamiento del recurso geotérmico, se ha diseñado un diagrama de flujo, que muestra la secuencia de actividades armonizados con el proceso de exploración, desarrollo del campo, construcción y operación de la planta, en el marco de la normatividad Colombiana (Decreto-Ley 2811 de 1974 y Decreto 2820 de 2010).

**Figura 35 Estudios y trámites ambientales en reconocimiento y prefactibilidad<sup>45</sup>**



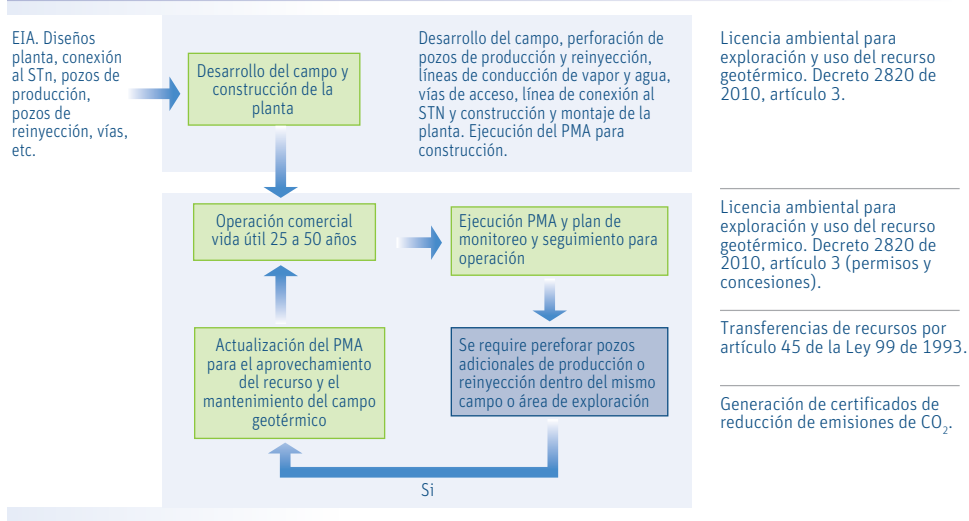
**Figura 36 Estudios y trámites ambientales en factibilidad<sup>46</sup>**



<sup>45</sup> Ver referencia 28.

<sup>46</sup> Ver referencia 28.

**Figura 37 Estudios y trámites ambientales para construcción y operación<sup>47</sup>**



Este ejercicio se encuentra basado en la experiencia adquirida por ISAGEN en el desarrollo del proyecto geotérmico del Macizo Volcánico del Ruiz.

## 6.5. Otras normas de interés

- La mitigación del cambio climático, la reducción de los aportes de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y el desarrollo de fuentes no convencionales de energía es un compromiso de Estado que se encuentra explícito en el Plan Energético Nacional (PEN) 2010–2030, en el Plan Nacional de Desarrollo 2010–2014 (Artículo 105 de la Ley 1450 de junio de 2011), la Ley de Uso Racional de Energía (Ley 697 de 2001) y el Decreto 3683 de 2003.
- Plan Energético Nacional (PEN) 2010–2030. Análisis y revisión de los objetivos de política energética colombiana de largo plazo y actualización de sus estrategias de desarrollo.
- Plan Nacional de Desarrollo 2010–2014 (Ley 1450 de junio de 2011, artículo 105), Por el cual el Gobierno Nacional ordena el diseño e implementación de una política nacional encargada de fomentar la investigación, el desarrollo y la innovación en las energías solar, eólica, geotérmica, mareomotriz, hidráulica, undimotriz y demás alternativas ambientalmente sostenibles, así como una política nacional orientada a valorar el impacto del

<sup>47</sup> Ver referencia 28.


carbono en los diferentes sectores y a establecer estímulos y alternativas para reducir su huella en nuestro país.

- Ley de Uso Racional de Energía (Ley 697 de 2001). Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones. En el artículo 2 se señala que es deber del estado dictar las normas necesarias para viabilizar el uso de las energías renovables.
- Decreto 3683 de 2003. Por la cual se reglamenta la Ley 697 de 2001 sobre el Uso Racional y Eficiente de la Energía.
- Plan Nacional de Desarrollo de Fuentes No convencionales de Energía (FNCE), específicamente Eólica, Solar, Biomasa, PCH (Pequeñas Centrales Hidráulicas), Energía de los océanos, Geotermia y Energía Nuclear.
- Ley 1111 de 2006 y decretos reglamentarios: Consagra beneficios tributarios aplicables al desarrollo de proyectos de generación, lo cual puede incluir los siguientes aspectos: Desarrollo de energías renovables; disminución de la emisión de gases de efecto invernadero; inversiones en desarrollo científico y tecnológico; inversiones en control y mejoramiento del medio ambiente (MDL); renta exenta por venta de energía eléctrica generada con base en los recursos eólicos, biomasa o residuos agrícolas; descuento Tributario (IVA) para importación de maquinaria pesada para industrias básicas y contratos de estabilidad jurídica.

- Anon, 1981. "Electrical Energy from the Volterra 'Soffioni'". Power 47: N° 15, p. 531. Anon., 1993. "New Geothermal Facility Exceeds Production Expectations". Geothermal Resources Council BULLETIN, 22: pp. 281–282.
- Austin, A. L. and A.W. Lundberg, 1978. The LLL Geothermal Energy Program: A Status Report on the Development of the total Flow Concept, Lawrence Livermore Laboratory Rep. UCRL-50046–77, Livermore, CA.
- Bliem, C. J., 1983. "Preliminary Performance Estimates and Value Analyses for Binary Geothermal Power Plants Using Ammonia-Water Mixtures as Working Fluids". INEL Rep. EGG-GTH-6477, Idaho Falls, ID.
- Cappetti, G. And G. Stefani, 1994. "Strategies for Sustaining Production at Larderello". Geothermal Resources Council TRANSACTIONS, 18: pp. 625–629.
- Cerini, D. J. and J. Record, 1983. "Rotary Separator Turbine Performance and Endurance Test Results", Proc. Seventh Annual Geoth. Conf. And Workshop, EPRI Rep. AP-3271, pp.5-75-5-86, Palo Alto, CA.
- Culver, G. G. and G. M. Reistad, 1978. "Evaluation and Design of Downhole Heat Exchangers for Direct Applications". Geo-Heat Center, Klamath Falls, OR.
- Demuth, O. J., 1981. "Analyses of Mixed Hydrocarbon Binary Thermodynamic Cycles for Moderate Temperature Geothermal Resources". INEL Rep. EGG-GTH-5753, Idaho Falls, ID.
- Demuth, O. J. and R. J. Kochan, 1981. "Analyses of Mixed Hydrocarbon Binary Thermodynamic Cycles for Moderate Temperature Geothermal Resources Using Regeneration Techniques". INEL Rep. Egg-gth-5710, Idaho Falls, ID.
- DiPippo, R., 1980. Geothermal Energy as a Source of Electricity: A Worldwide Survey of the Design and Operation of Geothermal Power Plants, USDOE/ RA/28320–1, US Gov. Printing Office, Washington.
- DiPippo, R. Khalifa, H.E. Correia, R. J. And J. Kestein, 1979. "Fossil Superheating in Geothermal Steam Power Plants". Geothermal Energy Magazine, 7: N° 1, pp. 17–23. DiPippo, R. And D. F. Marcille, 1984. "Exergy Analysis of Geothermal Power Plants". Geothermal Resources Council TRANSACTIONS, 8: pp. 47–52
- DiPippo, R., 1987. "Geothermal Power Generation from Liquid-Dominated Resources". Geothermal Science and Technology, 1: pp. 63–124.
- DiPippo, R., 1987. "Ahuachapan Geothermal Power Plant, El Salvador". Proc. Fourth Annual Geoth. Conf. And Workshop, EPRI Rep. TC-80–907, pp. 7–7–7–12, Palo Alto, CA, 1980.
- DiPippo, R. And P. Ellis, 1990. Geothermal Power Cycle Selection Guidelines, EPRI Geothermal Information Series, Part 2, Palo Alto, CA.

- DiPippo, R., 1995. "Geothermal Power Plants in the United States: A Survey and Update for 1990–1994". Geothermal Resources Council BULLETIN, 24: PP. 141–152.
- DiPippo, R. "Geothermal Power System," Sect. 8.2 in Standard Handbook of Powerplant Engineering, 2nd ed., T.C. Elliott, K.Chen and R.C. Swanekamp, eds., pp.8.27–8.60, McGraw-Hill, Inc., New York, 1998.
- Dunstall, M. G. and D. H. Freeston, 1990. "U-Tube Down-hole Heat Exchanger Performance in a 4-in. Well, Rotorua, New Zealand". Proceedings of the 12th New Zealand Geothermal Workshop, Auckland, New Zealand, pp. 229–232.
- Enel, 1993. The History of Larderello, Public Relations and Comm. Dept., Rome. Entingh, D. J. Easwaran, E. And L. McLarty, 1994. "Small Geothermal Electric System for Remote Powering". Geothermal Resources Council TRANSACTIONS, 18: pp. 39–46.
- Georgsson, L. S.; Johannesson, H. and E. Gunnlaugsson, 1981. "The BaerThermal Area of Western Iceland: Exploration and Exploitation". Transactions, Vol. 5, Geothermal Resources Council, Davis, CA, pp. 511–514.
- Gonzales Rubio, J. L. and F. Illescas, 1981. "Test of Total Flow Helical Screw Expander at Cerro Prieto, Mexico". Geothermal Resources Council TRANSACTIONS, 5: pp. 425–427, 1981.
- Gudmundsson, J. S. and J. W. Lund, 1985. "Direct Use of Earth Heat". Energy Research, Vol. 9, No. 3, John Wiley & Sons, NY, pp. 345–375.
- Habel, R., 1991. "Honey Lake Power Facility, Lassen County". Geothermal Hot Line, 20: N° 1, p.19.
- Jimenez Gibson, J., 1987. "Operation of the Five Unit of Cerro Prieto I Geothermal Power Plant". Proc. Ninth Annual Geoth. And Secon IIE-EPRI Geoth. Conf. And Workshop, Vol.2, English Vers., EPRI rep. AP-4259SR, pp. 7-1-7-9, Palo Alto, CA.
- Kagel Alyssa, Diana Bates. A Guide to Geothermal Energy and the Environment., & Karl Gawell. 2007.
- Kavanaugh, S. and K. Rafferty, 1998. Ground-Source Heat Pumps – Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings, ASHRAE, Atlanta, GA, 225 p.
- Lazalde-Crabtree, H., 1984. "Design Approach of Steam-Water Separators and Steam Dryers for Geothermal Applications". Geothermal Resources Council BULLETIN, 13: N°. 8, pp. 11–20.
- Leibowitz, H. M. and D. W. Markus, 1990. "Economic Performance of Geothermal Power Plants Using the Kalina Cycle Technique". Geothermal Resources Council TRANSACTIONS, 14(Part II): pp. 1037–042.
- Lund, J. W.; Lienau, P. J. and B. C. Lunis (editors), 1998. Geothermal Direct-Use Engineering and Design Guidebook, Geo-Heat Center, Klamath Falls, OR, 465 p.
- Moran, M. J., 1989. Availability Analysis: A Guide to Efficient Energy Use, Corrected edition, ASME Press, New York.



- 
- Kagel Alyssa, Diana Bates. A Guide to Geothermal Energy and the Environment., & Karl Gawell. 2007. By Alyssa Kagel, Diana Bates, & Karl Gawell. Geothermal Energy Association. Washington, D.C. 20003. Updated April 2007.
- Rafferty, K., 1983. "Absorption Refrigeration: Cooling with Hot Water". Geo-Heat Center Quarterly Bulletin, Vol. 8, No. 1, Klamath Falls, OR, pp. 17-20.
- Ram, H. And Y. Yahalom, 1988. "Commercially Successful Large Binary Applications". Geothermal Resources Council BULLETIN, 17: N°. 3, pp. 3-7.
- Ryan, G. P., 1981. "Equipment Used in Direct Heat Projects". Transactions, Vol. 5, Geothermal Resources Council, Davis, CA, pp. 483-485.
- Schochet, D. N. and j. E. Mock, 1994. "How the Department of Energy Loan Guarantee Program Paved the Way for the Growth of the Geothermal Industries". Geothermal Resources Council TRANSACTIONS, 18: pp. 61-65.
- Voge, E. Koenig, B. Eney, S. Beall, J.J. Adams, M.C. and J. Haizlip, 1994. "Initial Findings of the Geysers Unit 18 Cooperative Injection Project". Geothermal Resources Council TRANSACTIONS, 18: pp. 353-357.
- Wright, P.M., 1998. "A Look Around the World," Geothermal Resources Council BULLETIN, 27: PP. 154-155.

