

Notas para la investigación
y desarrollo de

proyectos geotérmicos en Colombia

333.794

l74n

Ej.1



Reg. 145

333317
174no

Notas para la investigación
y desarrollo de

**proyectos
geotérmicos
en Colombia**



Convenio ISAGEN - BID/JC

Colombia. Cooperación técnica no reembolsable No. ATN/JC-12150-CO, "Estudios de prefactibilidad para el campo geotérmico del Macizo Volcánico del Ruiz: Programa Estratégico de Investigación y Modelo del Sistema Hidrotermal Magmático."

Contrato BID. INE/ENE/CO-T1208/11

NIPPON KOEI LTDA. - GEOTHERMAL ENGINEERING CO., LTDA. - INTEGRAL INGENIEROS CONSULTORES S.A. 2012.

ISAGEN S.A. ESP.

Dirección de Investigación y Desarrollo
Carrera 43A No. 11A - 80 Avenida El Poblado, Medellín
Teléfono (574) 316 51 40, fax: (574) 268 46 46 extensión 5932
Correo electrónico: investigacionydesarrollo@isagen.com

Diseño y diagramación:
ARANGOVIEIRA Diseño Integral

Fotografías:
Servicio Geológico Colombiano
123rf.com

Foto Portada: Fuente: Página web del Servicio Geológico Colombiano (antes INGEOMINAS), cortesía de Jair Ramírez.

"ISAGEN S.A. E.S.P. participa 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 de lugar al pago de cualquier erogación a favor de sus autores."



Contenido


1. Introducción	5
2. Naturaleza y origen del recurso geotérmico	9
2.1 Origen del recurso geotérmico	12
2.2 Sistemas geotérmicos	14
2.3 Tecnologías de generación de energía eléctrica	19
2.4 Producción y conducción de vapor	22
3. Estado y perspectivas de la geotermia	23
3.1 Capacidad instalada de plantas geotermicas en el mundo	24
3.2 Perspectivas de crecimiento de la geotermia en el mundo	26
3.3 Desarrollo de la geotermia en Colombia	29
4. Beneficios de la geotermia	33
5. Fases de desarrollo de un proyecto geotérmico	35
5.1 Fase 1 - Reconocimiento	39
5.2 Fase 2 - Prefactibilidad	39
5.2.1 Restitución cartográfica	41
5.2.2 Geología	41
5.2.3 Geofísica	42
5.2.4 Geoquímica	47
5.2.5 Hidrogeología	48
5.2.6 Gradiente térmico	48
5.2.7 Modelo geotérmico y selección de sitios de perforación	52
5.2.8 Estudios ambientales	55

5.3 Fase 3 - Factibilidad	56
5.3.1 Perforaciones exploratorias y evaluación del reservorio	56
5.3.2 Evaluación de viabilidad técnica y económica	58
5.3.3 Diseño de la planta y planeación del desarrollo del campo	61
5.4 Fase 4 - Construcción y operación	61
6. Normas aplicables para el desarrollo y aprovechamiento de fuentes no convencionales de energía en Colombia	63
6.1 Convenios internacionales	64
6.2 Uso racional de energía y fuentes no convencionales	64
6.3 Incentivos tributarios para el desarrollo de fuentes no convencionales de energía	65
6.4 Normas ambientales	67
6.5 Código de recursos naturales renovables	69
6.6 Usos del agua	70
6.7 Código de minas	71
7. Retos para el desarrollo de la geotermia en Colombia	72
Bibliografía	74

A photograph of a geothermal landscape. In the foreground, a river of bright orange-red water flows through a rocky, layered bank. In the background, a large mountain is partially obscured by a thick mist or steam that rises from the ground. The sky is blue with scattered white clouds. On the left side of the image, the metal spiral binding of a notebook is visible.

1

Introducción



ISAGEN S.A ESP, es una compañía de generación y comercialización de energía, con más de cuarenta (40) años de experiencia en el desarrollo, construcción y operación de proyectos de generación de energía eléctrica en Colombia.

En cumplimiento de su objeto social de generación y comercialización de energía y consecuente con su enfoque de responsabilidad empresarial, fundamentado en una gestión sostenible, que permita satisfacer en el largo plazo, los diferentes intereses y necesidades de sus grupos de interés, se encuentra comprometida con el desarrollo de proyectos de generación basados en el aprovechamiento de fuentes renovables de energía convencionales y no convencionales.

De acuerdo con lo anterior, en la actualidad promueve y financia la investigación para el desarrollo y el aprovechamiento de la geotermia en Colombia. El desarrollo del recurso geotérmico puede darse en el País, porque se cuenta con una posición geográfica privilegiada y un marco geológico favorable, debido a que Colombia hace parte del Cinturón de Fuego del Pacífico. En esta zona el gradiente natural de temperatura en el subsuelo es alto porque hay actividad volcánica presente.

Como ejemplo de lo anterior, las zonas de influencia de los volcanes Chiles, Cerro Negro, Cumbal, Azufral, Galeras, Doña Juana, Sotará, Puracé, Huila, Ruíz y Tolima presentan fuentes de aguas termales, fumarolas y zonas de alteración hidrotermal superficial, que permiten inferir características adecuadas para el aprovechamiento de la geotermia, en especial de los fluidos de vapor de agua, agua caliente y el calor de las rocas en profundidad.



*El desarrollo del
recurso geotérmico
puede darse en el
País, porque se cuenta
con una posición
geográfica privilegiada
y un marco geológico
favorable, debido a
que Colombia hace
parte del Cinturón de
Fuego del Pacífico.*

Es así, como en este orden de ideas ISAGEN se encuentra realizando los estudios de prefactibilidad de dos (2) proyectos geotérmicos en áreas con un alto potencial geotérmico, localizadas en la zona de influencia del Macizo Volcánico del Ruíz - MVR y en la zona de influencia de los volcanes Tufiño-Chiles-Cerro Negro ubicada en la frontera con el Ecuador, respectivamente.

Para lograr este propósito, ISAGEN ha contado con el apoyo de diversas 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 (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).

En este documento se presenta, con el apoyo del BID a través de la cooperación técnica recibida del Fondo Japonés - JCF, una compilación de textos relacionados con el aprovechamiento del recurso geotérmico en el mundo y en particular de algunos avances del proyecto de generación de energía geotérmica desarrollado por ISAGEN en la zona de influencia del MVR.

Vale la pena mencionar, que el desarrollo y aprovechamiento de la geotermia, se encuentra dentro de los temas que el Estado colombiano ha priorizado en sus políticas de 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), en la Ley de Uso Racional de Energía (Ley 697 de 2001), el Decreto 3683 de 2003 que reglamenta la Ley 697, el Plan Indicativo 2010-2015 de junio del 2010 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 de julio de 2010 y en el Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014 promulgado en el mes de junio de 2011.

El objetivo principal de publicar estas notas, es contribuir a la difusión del desarrollo de la geotermia y su potencial aprovechamiento para la generación de energía eléctrica en el País.

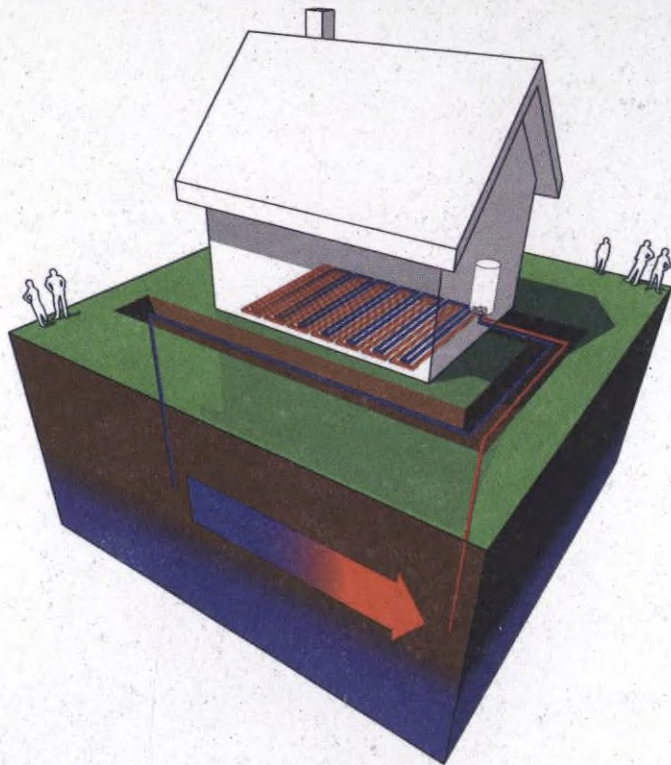
El documento incluye una presentación somera de los diferentes tópicos que se requiere abordar en el proceso de investigación y desarrollo del recurso geotérmico.



The background of the notebook cover is a photograph of a geothermal landscape. In the foreground, there is a dark, rocky terrain with several small, bubbling pools of water. In the middle ground, a dirt road winds through the landscape, with a small vehicle visible in the distance. The background features a large, dark mountain range under a cloudy sky. The overall color palette is dark and moody, with shades of blue, grey, and black.

2

Naturaleza y origen del recurso geotérmico



Calefacción con radiadores de piso y pared con fluidos geotérmicos.¹

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 expuestas a altas temperaturas, que calientan el agua de la lluvia que se infiltra en el subsuelo. En la superficie el agua caliente 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

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



Uso de geotermia para calefacción en la Hacienda La Quinta. Macizo Volcánico del Ruiz.²

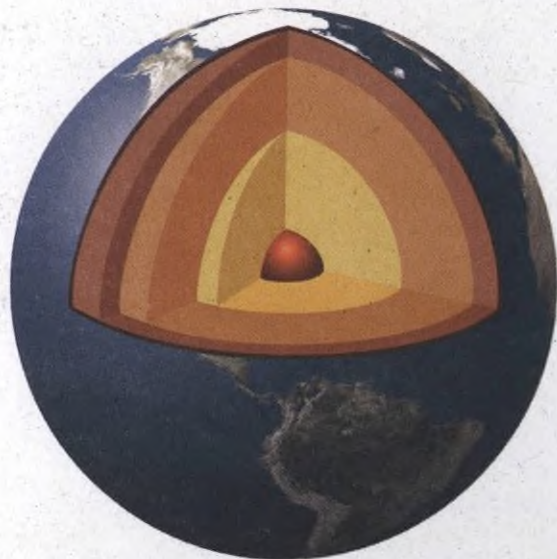
En 1904 se inició el uso de los fluidos geotérmicos como fuente de energía. En ese período se instaló en Italia una industria química en la zona conocida como Larderello, para extraer el ácido bórico contenido en las aguas calientes que se extraían de pozos perforados con ese fin. Posteriormente en este 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 MW³.

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 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.

² Fuente: ISAGEN 2011.

³ 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

2.1 Origen del recurso geotérmico



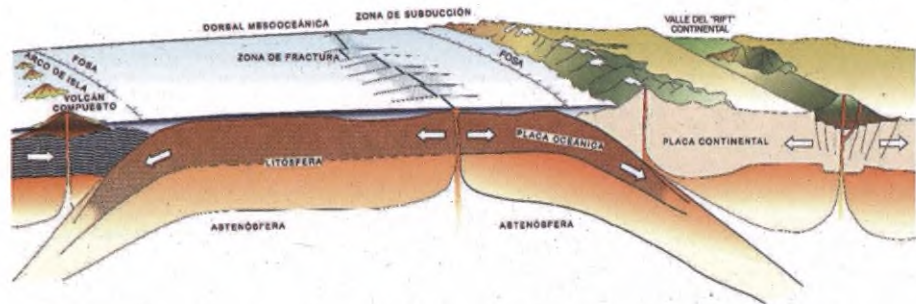
■	Corteza	30°C/km
■	Manto	>1000°C
■	Núcleo externo	>3000°C
■	Corteza Núcleo interno ..	>5000°C

Esquema de la estructura general de la tierra⁴.

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.

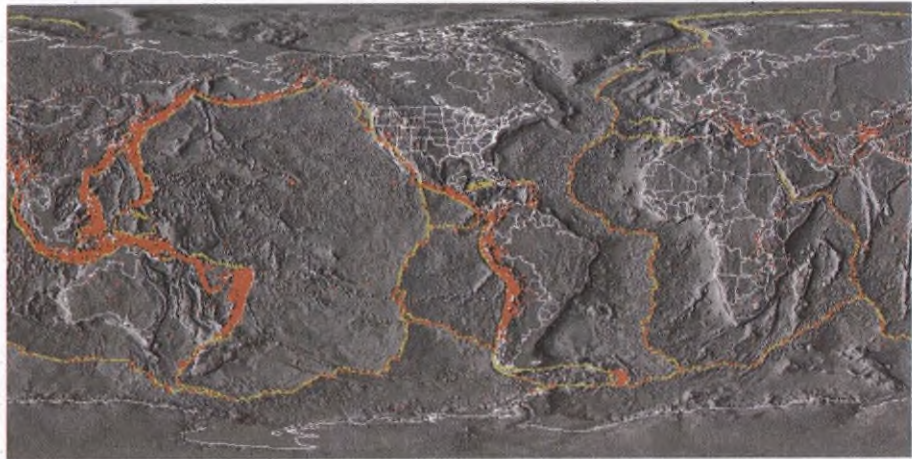
Por su parte, la corteza terrestre, más sólida y liviana, flota sobre el manto, desplazándose sobre él, lo cual produce un fenómeno conocido como deriva continental, causante del choque entre las placas continentales y las placas marinas. Dicha colisión produce la subducción, un fenómeno que hace deslizar 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, se incrementan los movimientos telúricos y se sucede el levantamiento de las cordilleras.

⁴ Ver referencia 3.



Sección transversal esquemática mostrando el proceso de tectónica de placas⁴.

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



Cinturón de Fuego del Pacífico⁵.

⁵ http://www.windows2universe.org/earth/images/RIM_of_FIRE_gif_image.html&lang=sp

En algunas regiones, especialmente en aquellas donde se presentan volcanes, el gradiente geotérmico es superior al normal.

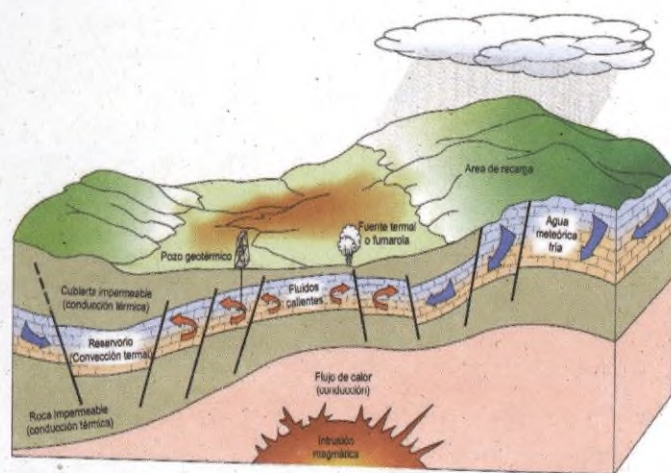
El gradiente geotérmico o aumento de la temperatura de la tierra con la profundidad es una variable indicativa del potencial geotérmico de un sitio. Un valor normal de gradiente térmico corresponde a un aumento de entre 25 y 30°C/km.

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.

2.2 Sistemas geotérmicos

Se denomina sistema geotérmico a un conjunto de elementos naturales que se presentan en una misma área (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 por causa de la intrusión de un cuerpo volcánico; 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, generalmente mayores a dos kilómetros.
- b. Reservorio geotérmico:** formación de rocas permeables, donde circule 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.



Representación esquemática de un sistema geotérmico ideal⁴.

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.

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 (CO₂), sulfatos (SO₄) 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:

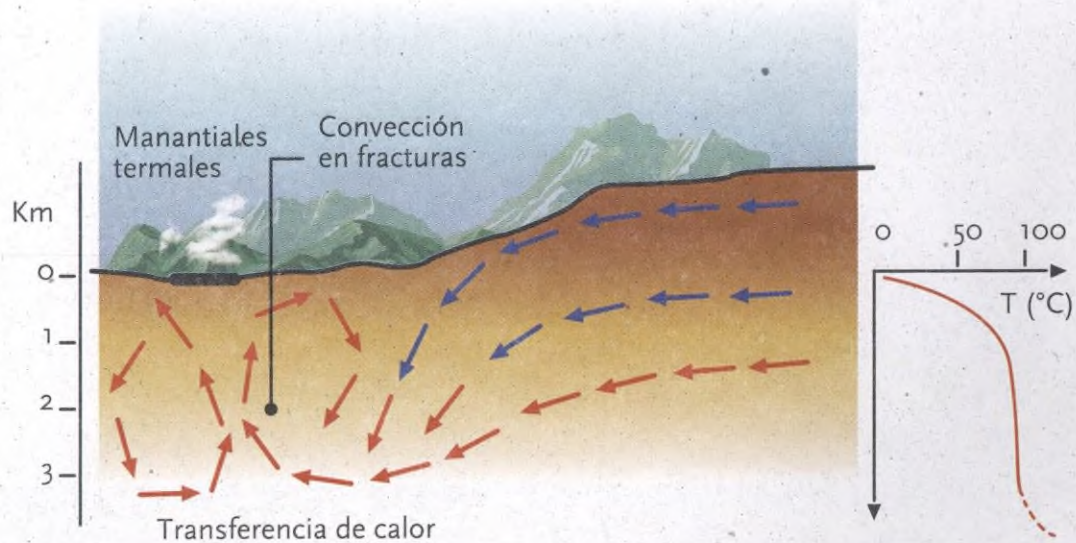
Clasificación del recurso o fluidos geotérmicos⁶

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

⁶ 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>

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 del 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.



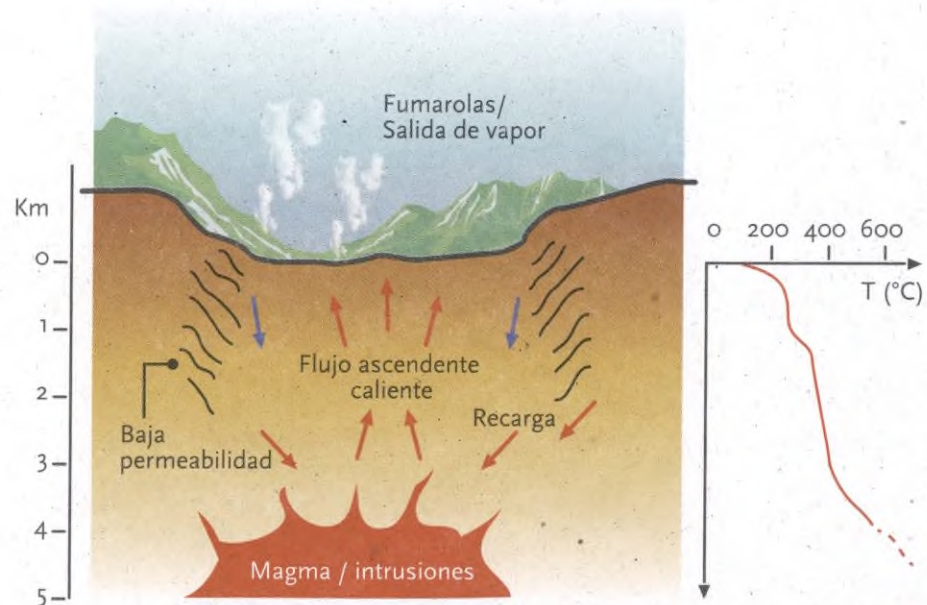
Esquema de la circulación del agua en un sistema controlado por una falla⁷.

⁷ 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>



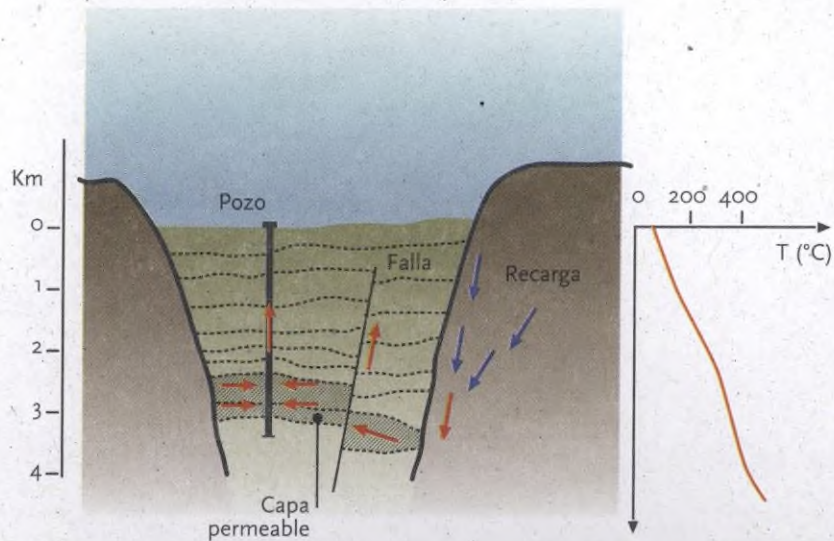
La estructura, geometría y funcionamiento de un sistema geotérmico parece bastante simple, sin embargo entender y representar fielmente un sistema geotérmico real, a partir de sus modelos, no es fácil. Para ello se requiere la recolección en campo y la compilación y análisis en oficina de información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

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.



Esquema de un sistema geotérmico volcánico.⁷

Esquema de un sistema geotérmico de una cuenca sedimentaria⁷.



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 caso de encontrar 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 se hayan utilizado, perdiendo calor y presión; de esta manera se asegura la recarga del reservorio.

El corazón de un sistema geotérmico lo constituye la fuente de calor.

Otra forma de mantener campos geotérmicos viejos o agotados, es la recarga artificial mediante pozos de reinyección. Así se hizo cuando, debido a una falta de fluidos, en 1998 la producción empezó a declinar dramáticamente en el campo geotérmico de los Geysers en California (EE.UU). Allí se inició el transporte y reinyección de 0,48 m³/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 eléctricas del campo⁸.

⁸ Calpine. <http://www.geysers.com/history.htm>

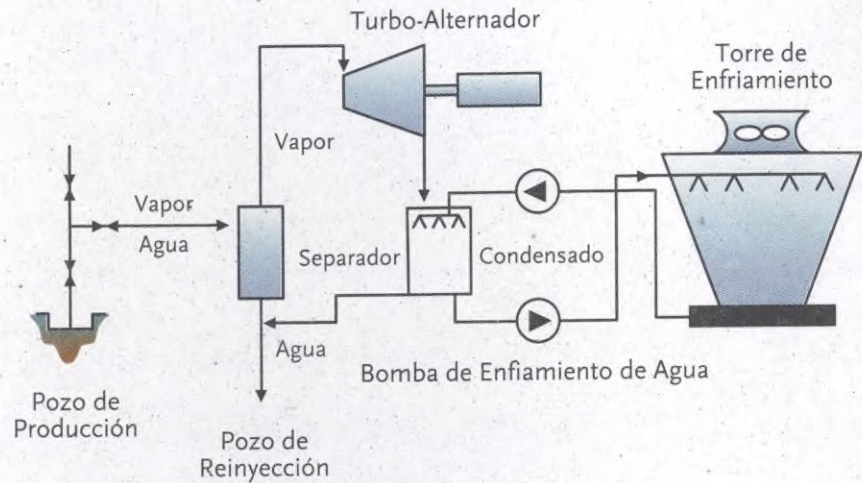
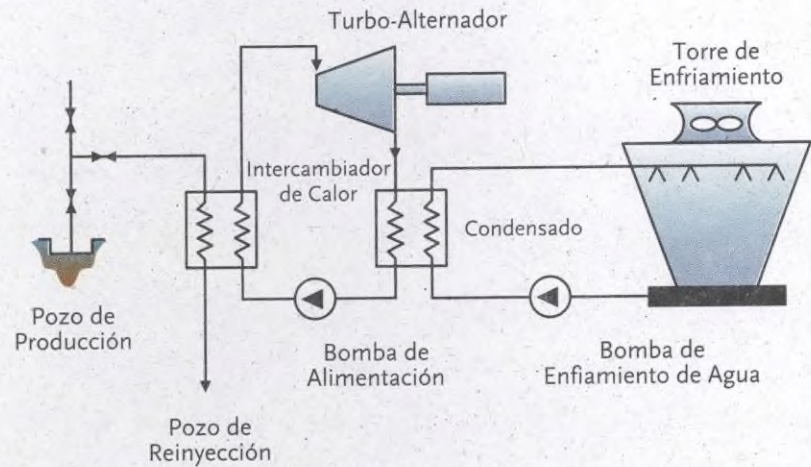


2.3 Tecnologías de generación de energía eléctrica

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, produce 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 la 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 mayores a 100°C e inferiores a los 200 °C en la 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, amoniaco, 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.

Esquema general de una planta tipo Flash⁴.Esquema general de una planta tipo Binaria⁴.

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 las que se pueden encontrar:



Turbina de vapor para geotermia
en mantenimiento⁹.

Estación de separación de vapor
de una central geotérmica¹⁰.

- 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 como fuente de calor en agricultura, piscicultura 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 el 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.

⁹ Fuente: ISAGEN 2010.

¹⁰ Fuente: ISAGEN 2010.

2.4 Producción y conducción de vapor



Línea de conducción y cabeza de pozo en campo geotérmico en El Salvador¹¹.

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 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 baja 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.

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, 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.

¹¹ Fuente ISAGEN 2010.



3

Estado y perspectivas de la geotermia

3.1 Capacidad instalada de plantas geotérmicas 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 tienen, en conjunto, el 90% de la capacidad instalada total.

Capacidad y tipo de Plantas instaladas en el mundo para el año 2010¹²

País	Flash (contrapresión)		Binaria		Flash (una etapa)		Flash (multietapa)		Vapor seco ¹³		Total	
	MW	Unidades	MW	Unidades	MW	Unidades	MW	Unidades	MW	Unidades	MW	Unidades
EE. UU.			653	149	59	4	795	30	1585	25	3092	208
Filipinas			209	18	1330	31	365	7			1904	56
Indonesia	2	1			735	14			460	7	1197	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

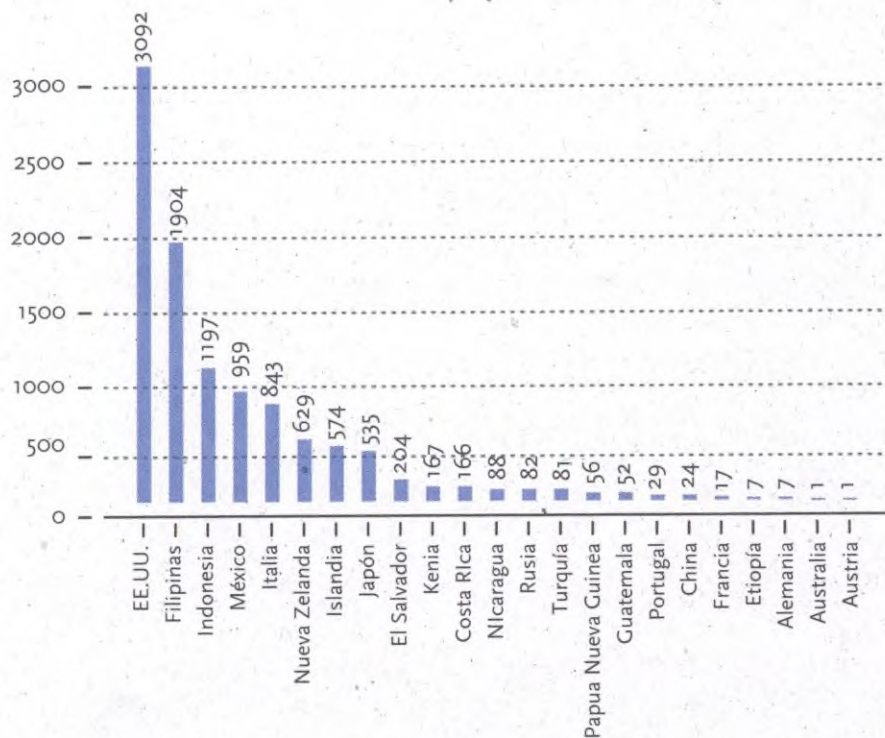
¹² Geothermal Power Generation in the World 2005 – 2010. Update Report. Ruggero Bertani. <http://iea-gia.org/documents/LongTermGeothermElecDevelopWorld-Bertaioffenburg23Feb09.pdf>

¹³ Vapor seco. Agua en estado gaseoso, sin presencia de agua en estado líquido.

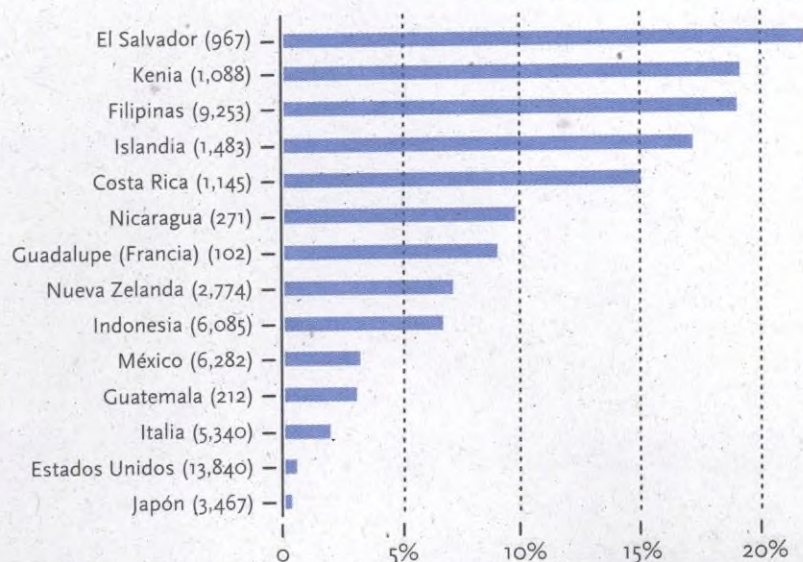


País	Flash (contrapresión)		Binaria		Flash (una etapa)		Flash (multietapa)		Vapor seco ¹³		Total	
	MW	Unidades	MW	Unidades	MW	Unidades	MW	Unidades	MW	Unidades	MW	Unidades
Guatemala			52	8							52	8
Portugal			29	5							29	5
China							24	8			24	8
Francia			2	1	10	1	5	1			17	3
Etiopía			7	2							7	2
Alemania			7	3							7	3
Australia			1	2							1	2
Austria			1	3							1	3
Tailandia							0	1			0	1
TOTAL	145	25	1180	236	4420	141	2091	61	2879	62	10.715	525

Capacidad instalada en 2010 (MW)
en el mundo¹²



Algunos países como Islandia y El Salvador que tienen una capacidad instalada en geotermia más baja, si se comparan con Estados Unidos, Filipinas, Indonesia o México, usan de manera intensiva la geotermia y esta fuente constituye una parte importante de su matriz energética.



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 2004.¹²

3.2 Perspectivas de crecimiento de la geotermia 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.



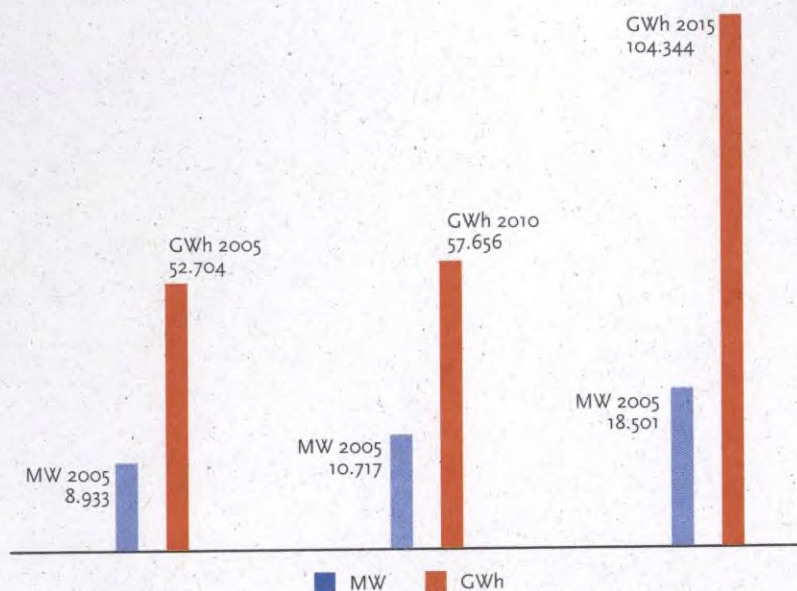
A nivel latinoamericano el país donde se prevé un mayor crecimiento de este tipo de energéticos es México, que en 2010 contaba con cerca de 1.000 MW. También se espera que crezca la capacidad instalada en otras naciones de la región, tales como Nicaragua, Guatemala, El Salvador, Chile y Colombia, entre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

Crecimiento de la capacidad instalada y generación geotérmica:

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%
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		

País	Instalado 2005 MW	Energía 2005 GWh	Instalado 2010 MW	Energía 2010 GWh	Pronóstico 2015 MW	Incremento desde 2005			
						MW	GWh	Capacidad %	Energía %
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%
TOTAL	8.933	52.704	10.717	57.656	18.501	1.785	3.859	2327%	1678%

Crecimiento de la capacidad instalada
y generación geotérmica¹⁴.



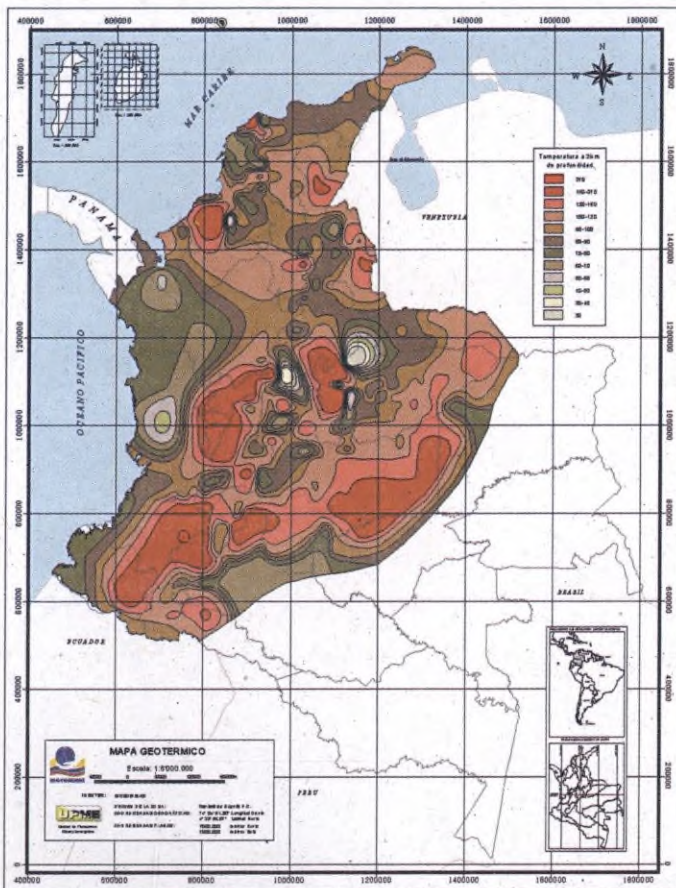
14 Ver referencia 12.



3.3 Desarrollo de la geotermia en Colombia

A la fecha Colombia no cuenta con generación de energía eléctrica aprovechando la geotermia. En el país se han realizado diferentes estudios desde finales de la década de 1970, entre los cuales se encuentran:

- Estudio de reconocimiento de campos geotérmicos existentes entre Colombia y Ecuador, entre otros países (evaluación de potencial), elaborado entre 1979 y 1982 por OLADE, Aquater, BRGM y Geotérmica Italiana.
- 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; Geocónsul 1992; GESA 1997).
- Mapa Geotérmico de Colombia. Ingeominas 2000.
- Estudios de investigación de los sistemas geotermiales de las áreas de los Volcanes Azufral, Cumbal (Ingeominas 1998-1999, 2008-2009; Ingeominas - Universidad Nacional de Colombia 2006).
- Mapa Geotérmico de Colombia. Ingeominas - ANH 2008.
- Estudios de investigación de los sistemas geotermiales de las áreas de Paipa e Iza (Ingeominas 2005, 2008-2009).

Mapa geotérmico de Colombia¹⁵.Manantiales termales en el Macizo Volcánico del Ruíz¹⁶.

15 INGEOMINAS - ANH 2008. http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/energias_alternativas/potencialidades/mapaGeotermia.pdf

16 Fuente: ISAGEN 2008.



Manantiales termales en el Macizo
Volcánico del Ruiz¹⁶.



Por su parte ISAGEN, ha realizado una serie de estudios sobre energías renovables y fuentes no convencionales, con el propósito de avanzar en su desarrollo y potencial aprovechamiento. Los estudios mencionados han contado con el apoyo de diversas 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 (antes INGEOMINAS), la Agencia para el Comercio y el Desarrollo de los Estados Unidos de América (USTDA), el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), el Fondo Japonés de Servicios de Consultoría (JCF) y el Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF por sus siglas en inglés), 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:

- Nuevas tecnologías de generación (ISAGEN-1997).
- Nuevas tecnologías de generación, actualización y viabilidad en Colombia (ISAGEN, UNAL - 2004).
- Regulación para incentivar las energías alternas y la generación distribuida en Colombia (ISAGEN, COLCIENCIAS, Universidad de los Andes, Universidad Nacional de Colombia. 2006-2008).
- Factibilidad básica para el desarrollo de un proyecto geotérmico en Colombia (ISAGEN, INGEOMINAS, USTDA - 2008).

En el año 2009 ISAGEN promueve y gestiona los recursos y la suscripción de convenios de cooperación para la realización de los estudios de prefactibilidad técnica, económica y ambiental de dos proyectos geotérmicos: El Proyecto Geotérmico del Macizo Volcánico del Ruíz y el Proyecto Geotérmico Binacional Tufiño - Chiles - Cerro Negro, los cuales inician su fase de ejecución a partir del 2010:

- Programa estratégico para el modelamiento del sistema hidrotermal magmático para el Proyecto Geotérmico Macizo Volcánico del Ruíz. 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 magnetoteléuricos para el Proyecto Geotérmico Macizo Volcánico del Ruíz. Capacitación y entrenamiento en la aplicación de la tecnología de magnetoteléurica (ISAGEN, INGEOMINAS, CIF, UNAM y COLCIENCIAS 2011 - 2012).
- Estudios de prefactibilidad sobre recursos geotérmicos en dos áreas seleccionadas ubicadas en el Macizo Volcánico del Ruíz. 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 Ruíz. Colombia (ISAGEN, BID/Fondo Japonés 2011 - 2012).
- Inversiones catalizadoras para energía geotérmica. Complementación del modelo resistivo del subsuelo, asesoría y acompañamiento etapá de perforación exploratoria. (ISAGEN, BID/GEF 2011 - 2014).
- 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.).



4

Beneficios de la geotermia

Renovable
limpia
confiable
reduce
emisiones
saneamiento
ambiental

La geotermia presenta una serie de características que la hacen una tecnología muy atractiva para la generación de energía eléctrica. Ha sido desarrollada y usada de manera intensiva por algunos países tales como Estados Unidos, México, El Salvador, Costa Rica, Guatemala, Nicaragua, Islandia, Italia, Japón, Indonesia y Filipinas.

A continuación se presentan algunos de los beneficios más importantes:

- Es una forma de energía renovable y limpia.
- Utiliza tecnologías probadas y confiables que se comercializan a nivel mundial.
- Produce energía de manera confiable durante todo el año y no es afectada por la estacionalidad de la hidrología.
- Utiliza recursos geotérmicos a grandes profundidades que no afectan las aguas termales que brotan en superficie.
- Contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero por la sustitución de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica.
- Contribuye a las políticas mundiales que promueven la incorporación de fuentes renovables no convencionales de energía que mitiguen el cambio climático.
- Requiere menores espacios para la construcción y operación.
- Genera un número importante de empleos directos e indirectos, así como otros beneficios para las comunidades localizadas de su zona de influencia.
- Permite llevar a cabo actividades de agricultura, ganadería, silvicultura o conservación dentro de los campos geotérmicos.
- Permite apropiarse y transferir recursos a los municipios y corporaciones ambientales locales para la conservación y el saneamiento ambiental.



5

Fases de desarrollo de un proyecto geotérmico

*No es posible
comprobar si existe
el recurso geotérmico
en cantidad y calidad
aprovechable hasta
que se ejecute la fase
de factibilidad*

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 existe el recurso geotérmico en cantidad y calidad aprovechable hasta que se ejecute la fase de factibilidad, en la cual se realizan las perforaciones exploratorias, 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 una mayor cantidad de información geológica, geofísica, geoquímica e hidrogeológica, permite la construcción de un Modelo Conceptual del Sistema Geotérmico más cercano a la realidad y por tanto, se aumenta la probabilidad de éxito en la exploración. Sin embargo sólo la perforación exploratoria puede confirmar la existencia del recurso geotérmico. La exploración geotérmica busca, entre otras cosas, lo siguiente¹⁷:

- a. Identificar el proceso geotérmico que está ocurriendo.
- b. Identificar si existe un campo geotérmico aprovechable.
- c. Estimar el tamaño del reservorio y 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. Compilar un conjunto de antecedentes del campo y establecer los futuros controles.
- h. Determinar los parámetros ambientalmente relevantes, previo a la explotación.
- i. Apropiar el conocimiento acerca de las características del campo para su desarrollo.

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

¹⁷ Prospecting for Geothermal Resources, Lumb 1981. <http://geothermal-energy.org/files-31.html>



Fases del desarrollo de un proyecto geotérmico¹⁸:

Fase	Objeto	Actividades
Fase 1. Reconocimiento	<ul style="list-style-type: none"> • 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"> 1. Identificación de zonas potenciales. 2. Análisis de viabilidad preliminar de un desarrollo geotérmico. 3. Análisis de restricciones ambientales. 4. Planeación de la ejecución de los estudios de prefactibilidad.
Fase 2. Prefactibilidad	<ul style="list-style-type: none"> • 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"> 5. Estudios de geología, geofísica, geoquímica e hidrogeología. 6. Gradiente térmico. 7. Elaboración de modelos geotérmicos. 8. Selección de sitios de perforación. 9. Diseño de perforaciones exploratorias. 10. Elaboración del Estudio de Impacto Ambiental para perforaciones exploratorias. 11. Trámite de la licencia ambiental para perforaciones exploratorias.
Fase 3. Factibilidad	<ul style="list-style-type: none"> • Localizar y llegar hasta el reservorio, obtener fluidos y evaluar la calidad y cantidad disponible del recurso para generación de energía. • Realizar los 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"> 12. Perforaciones exploratorias. 13. Evaluación del yacimiento. 14. Análisis de viabilidad técnica y económica del desarrollo de un proyecto geotérmico. 15. Diseño de la planta y planeación del desarrollo del campo. 16. Ejecución del Plan de Manejo Ambiental para las perforaciones exploratorias. 17. Realización del Estudio de Impacto Ambiental para el desarrollo del campo, construcción y operación de la planta de generación. 18. Trámite de la licencia ambiental para el desarrollo del campo, construcción y operación de la planta.
Fase 4. Desarrollo del Campo	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo del campo geotérmico con criterios de sostenibilidad. 	<ol style="list-style-type: none"> 19. Perforación de pozos de producción. 20. Perforación de pozos de reinyección. 21. Ejecución del PMA para cada una de las actividades de desarrollo del campo.

¹⁸ Fuente: ISAGEN 2011.

Fase	Objeto	Actividades
Fase 5. Construcción de la Planta y Puesta en Operación	<ul style="list-style-type: none"> Puesta en operación de la planta y el campo geotérmico. 	22. Construcción de la planta y obras asociadas (líneas de conducción de agua y vapor, vías de acceso, subestación, línea, etc.). 23. Alistamiento de la planta y el campo. 24. Puesta en operación comercial. 25. Ejecución del Plan de Manejo Ambiental para la operación de la planta y el campo geotérmico.

Diagrama de flujo para el desarrollo de un proyecto geotérmico¹⁹.

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

¹⁹ Lectures on Enhanced Geothermal Systems, Ernst Huenges, UNU-GTP 2011. <http://www.os.is/gogn/unu-gtp-report/UNU-GTP-2011-04.pdf>



utilizados se tornan más sofisticados, detallados y costosos, por tanto la magnitud y presupuesto del programa 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:

- La existencia de zonas con restricciones ambientales como posibles limitantes para el desarrollo de un proyecto: áreas sensibles ambientalmente, zonas de reserva forestal, zonas pertenecientes al Sistema de Parques Nacionales Naturales y el 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.
- 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 hidrotermal²⁰.

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, que se considera fundamental en la medida que tiene como fin

²⁰ Alteración hidrotermal: zonas donde la roca original ha sufrido cambios en su composición causados por fluidos hidrotermales con alta temperatura formando minerales como la esméctita, alunita, entre otros.

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 y culminan con la elaboración del Modelo Geotérmico Conceptual y la selección de sitios para perforación exploratoria, como se ilustra a continuación.

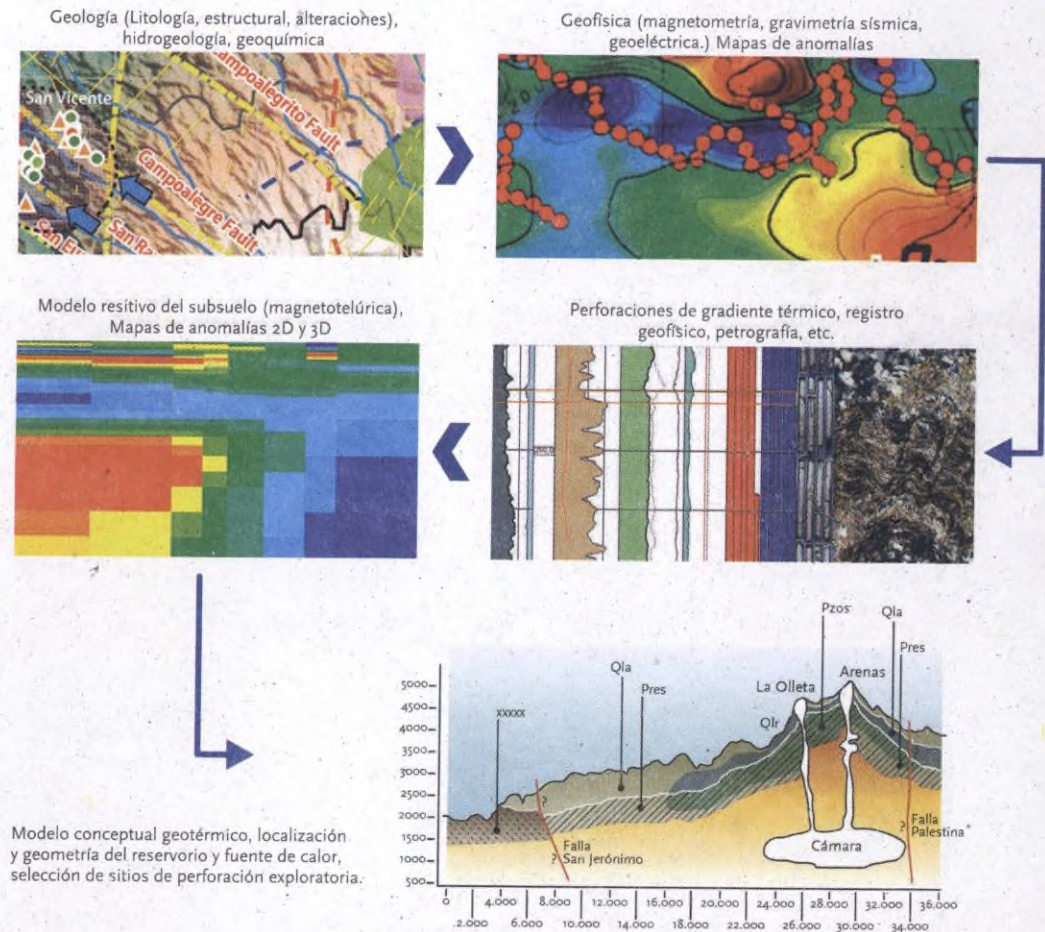


Diagrama de flujo de la fase de prefactibilidad²¹.

²¹ Programa estratégico modelo hidrotermal magmático del Macizo Volcánico del Ruiz; estudio de gravimetría y Magnetometría; ISAGEN, COLCIENCIAS, UNAL, INGEOMINAS; Orlando Hernandez et al; 2011.



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 su origen y 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 y las fallas.

Los estudios de geología superficial buscan determinar las zonas que han sido afectadas por fluidos geotérmicos y que presentan alteraciones hidrotermales; así como la localización, tipo, rumbo y buzamiento de las fallas geológicas.

Las fallas revisten gran importancia para la geotermia, por medio de las mismas los reservorios geotérmicos se recargan 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 geotérmico.

Los estudios geológicos se realizan mediante la revisión de la información de la zona, fotointerpretación y campañas de campo con muestreo

de rocas, la elaboración de perfiles estratigráficos y 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 de profundidad. El estudio se basa en anomalías y contraste de las propiedades magnéticas, eléctricas, de densidad que tienen relación con el contenido de agua y la composición de las rocas. Las variables físicas que son de interés para la exploración geotérmica son:

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



Ejemplo de magnetómetros, gravímetros y magnetotelurómetros²².

²² Investigación del modelo resistivo del subsuelo a partir de sondeos de magneto telúrica; ISAGEN, COLCIENCIAS, INGEOMINAS, CIF, UNAM; Jorge Arzate et al, 2012.



5.2.3.1 Gravimetría y magnetometría

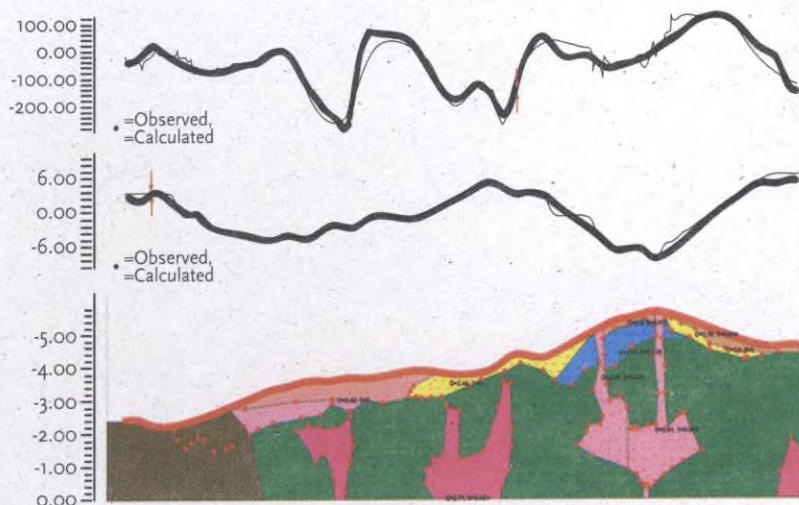
Con estos métodos es posible detectar contrastes en la densidad y la susceptibilidad magnética de las rocas en profundidad. Los resultados pueden ser interpretados para modelar la geometría y la distribución de unidades litológicas y estructuras geológicas del área de estudio. Las variaciones en la densidad 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.

Las anomalías de Bouguer representan los resultados de los estudios de gravimetría ubicados en planos que indican la variación lateral de la densidad con relación a una estación base, es decir, 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.

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 ayudan en la identificación de 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.

Perfil geológico geofísico de
anomalías gravimétricas y de
magnetometría²³.



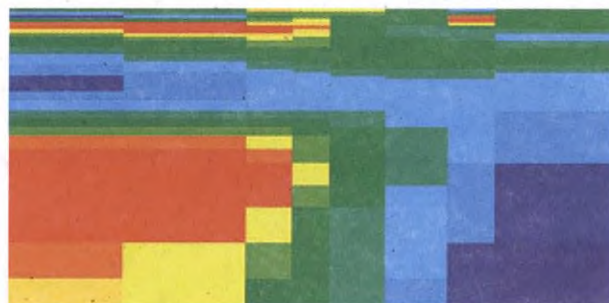
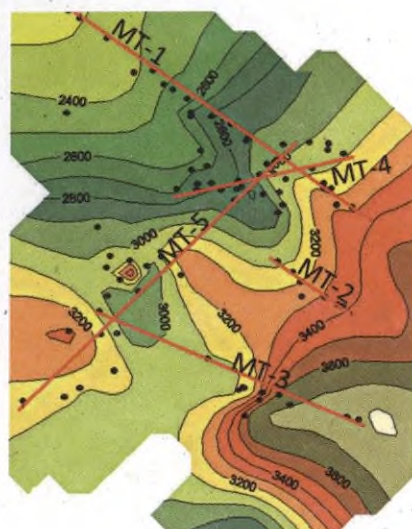
Para este tipo de estudios se utilizan equipos especializados (magnetómetros y gravímetros) que son portátiles y se colocan en zonas aisladas de ruido, tráfico automotor y líneas eléctricas por breves periodos de tiempo, para captar y almacenar las variaciones magnéticas y gravimétricas del subsuelo,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

5.2.3.2 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.

²³ Estudio de Prefactibilidad del Campo Geotérmico Macizo Volcánico del Ruiz; Convenio ISAGEN BID ATN/JC-12150-CO; 2012.



Ejemplo de un modelo resistivo del subsuelo mediante magnetotelúrica²⁴.

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 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, mayor que con otros métodos.

²⁴ Ver referencia 22.

5.2.3.3 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. Se supone que la velocidad de la onda aumenta con la profundidad, sin embargo a medida que se presentan cambios en la estratigrafía, discontinuidades u obstáculos, también varía la velocidad de propagación de la onda.

Este método se considera útil para determinar las fallas (rumbo y buzamiento) de una zona que pueden estar asociadas con el sistema geotérmico. En los sitios con actividades volcánicas activas se presentan abundantes microsismos y un alto nivel de ruido sísmico.

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

5.2.3.4 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 lo cual es posible determinar la resistividad aparente. Para lograrlo se usan 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.

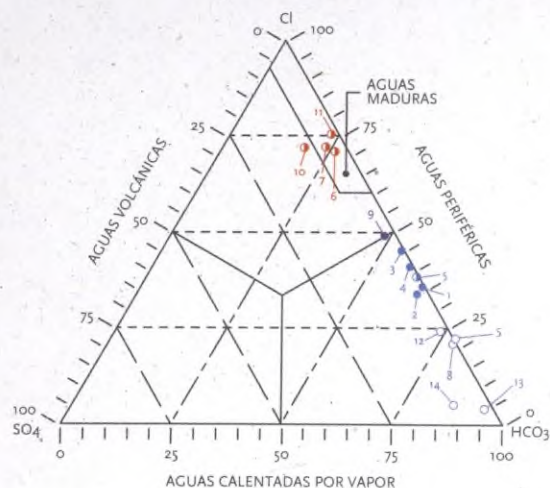


Diagrama ternario de composición química del agua (aniones)²⁵

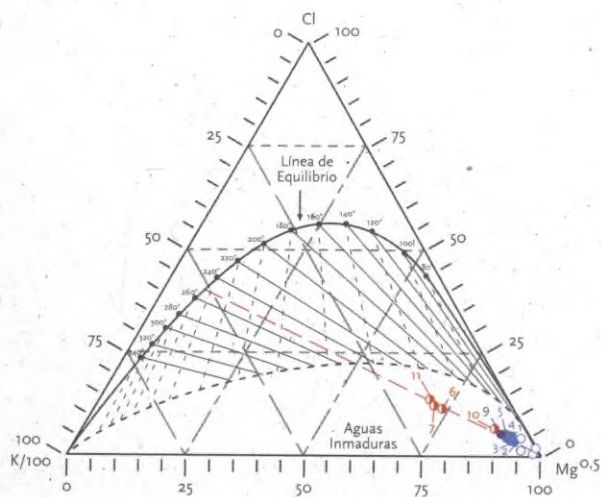


Diagrama ternario de composición química del agua (cationes)²⁵

²⁵ Programa estratégico modelo hidrotermal magmático del Macizo Volcánico del Ruiz; Estudio de Geoquímica; ISAGEN, COLGIENCIAS, UNAL, INGEOMINAS; Andrea Linares et al; 2011.

5.2.4 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. En el proceso se realiza mediante análisis del contenido de: calcio (Ca), sodio (Na), boro (B); cloruros (Cl^-), hierro total (Fe), magnesio (Mg), potasio (K), silicio (Si), sulfatos ($\text{SO}_4=$), bicarbonatos ($\text{CO}_3=$), dióxido de carbono (CO_2) 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, la 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, para lo cual se usan diagramas que muestran la relación entre los contenidos de algunos cationes y aniones en los fluidos y la temperatura del reservorio, el contenido de vapor, contenido de agua y su madurez.

Mediante la interpretación de los resultados de la geoquímica y el uso de estos diagramas es posible deducir algunas características de los sistemas geotérmicos de la zona del Macizo Volcánico del Ruiz, tales como origen, temperatura del reservorio, el grado de madurez, la mezcla con aguas superficiales o frías y la conexión con el sistema magmático; 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.

5.2.5 Hidrogeología

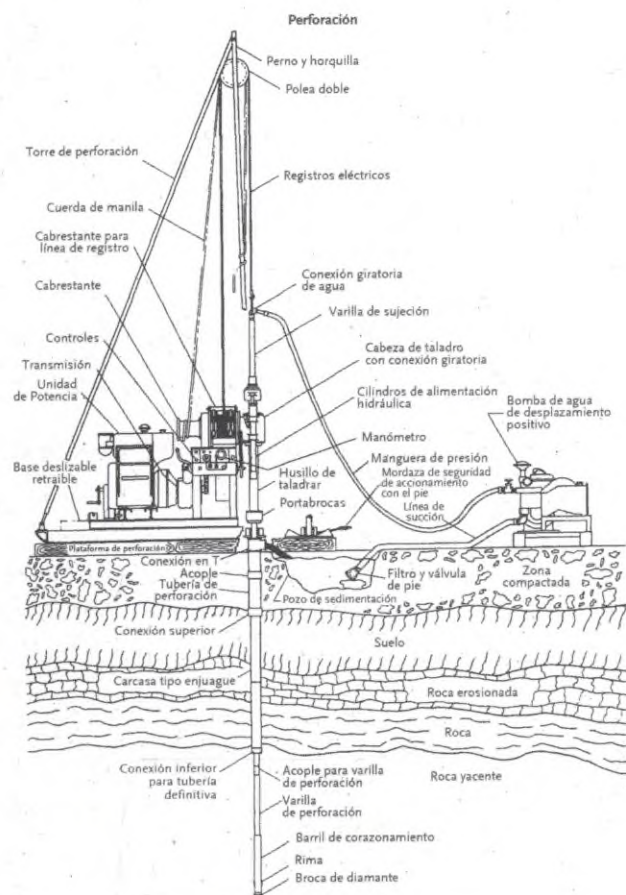
A partir de la identificación de las unidades litológicas de la zona de interés y sus propiedades, así como de la red hidrográfica, la climatología y la geoquímica, se elabora el estudio de hidrogeología.

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 miden la variación de la resistividad del subsuelo que se analizan junto con la información química y de algunos isótopos utilizados como trazadores.

5.2.6 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



Equipo de perforación de gradiente térmico y broca para corte de núcleos²⁶

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.

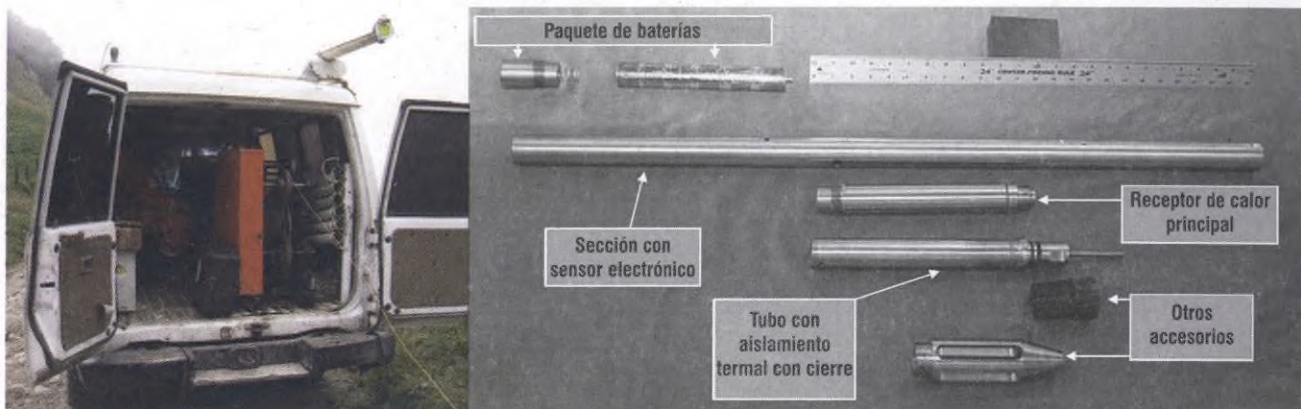
Durante la perforación de los pozos de gradiente térmico se hace la recuperación de los núcleos de roca con el fin de realizar ensayos de laboratorio para estimar el coeficiente de conductividad térmica, el calor específico y la porosidad, con lo cual se estima el flujo de calor o su potencial en términos 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.



²⁶ U.S. Geological Survey Department of the Interior/USGS U.S. Geological Survey. http://pubs.usgs.gov/twri/twri2-f1/pdf/twri_2-F1_b.pdf

Fuente: ISAGEN 2011.



Malacate, cable, unidad de registro y sonda de registro geofísico de pozos²⁷.

Componentes principales de una herramienta de medición de presión y temperatura*:

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 de la zona de interés, entre ellos:

- o **Caliper (Calibración):** 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.
- o **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 ricas en carbonatos, feldspatos o "shales" también presentan alta radioactividad natural.
- o **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 del pozo. Este ensayo contribuye a detectar capas permeables por la difusión de iones. También se emplea para detectar el nivel freático en el interior del pozo.

²⁷ Ver referencia 26.

* Sandia Laboratories 1998. <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/1998/980165.pdf>



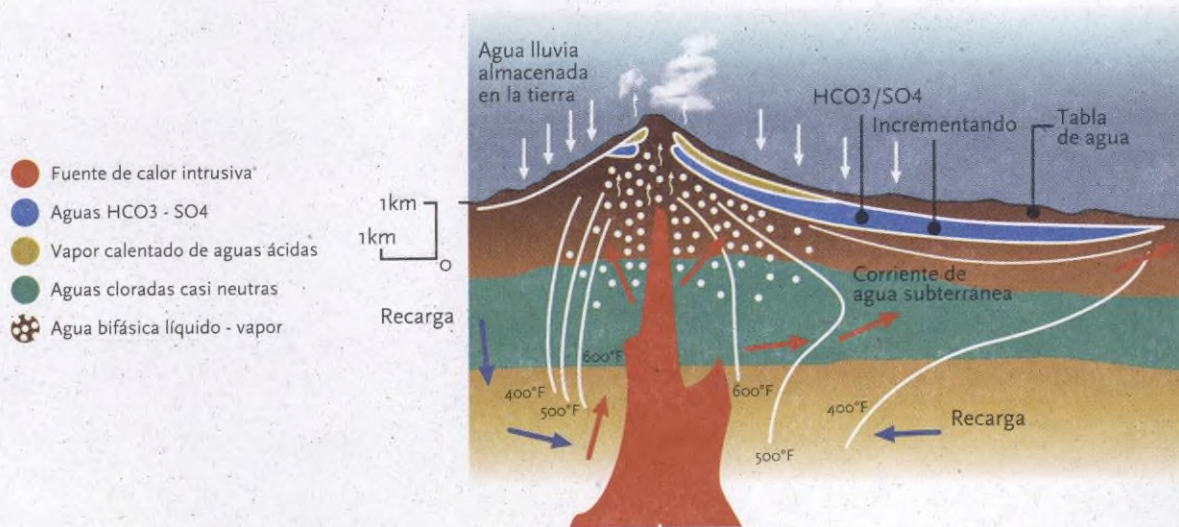
- o **Resistividad:** mide la capacidad de la roca para conducir la electricidad con la profundidad. Esta medida sirve para detectar el agua de la formación.
- o **Densidad:** mide la cantidad de masa por unidad de volumen de las rocas en la profundidad del pozo, sirve para identificar diferentes capas de roca. Este sondeo se emplea para complementar los estudios de gravimetría que se realizan en la superficie del terreno.
- o **Neutrón/Neutrón:** sirve para detectar estratos con alta porosidad y contenido de agua, por su comportamiento ante la radiación.
- o **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.
- o **Presión:** mide la variación de la presión en la profundidad del pozo.
- o **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.

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.

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.

5.2.7 Modelo geotérmico y selección de sitios de perforación

Un modelo geotérmico 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.



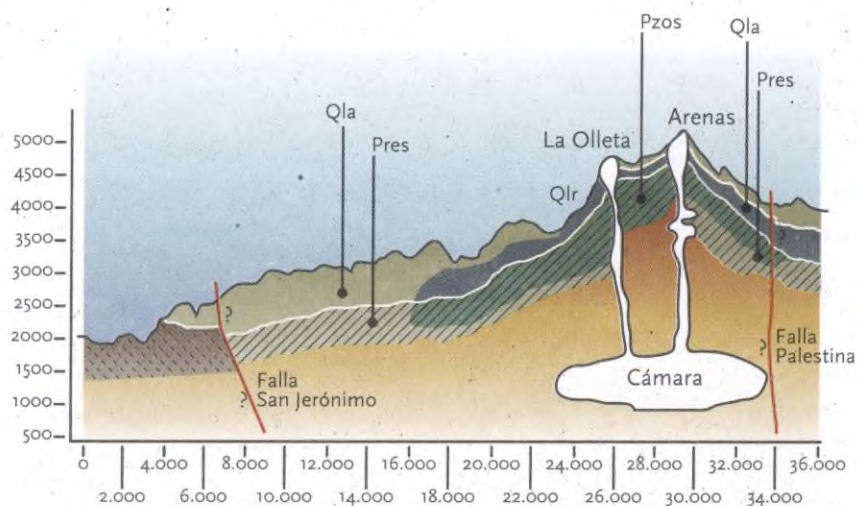
Modelo geotérmico teórico de un sistema volcánico²⁸.

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

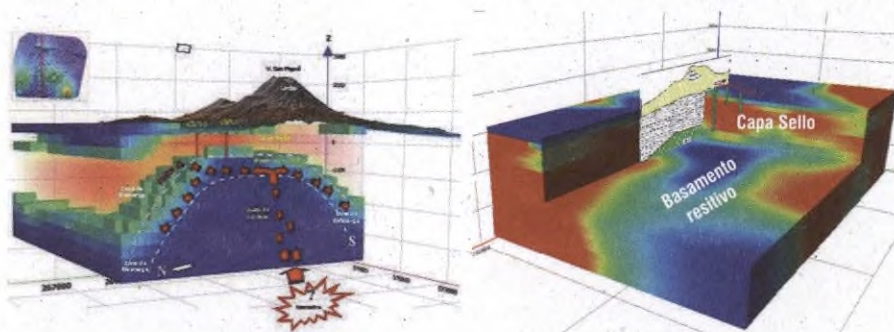
²⁸ Feasibility Study of Geothermal Power Generation in Colombia Boston Pacific; ISAGEN, USTDA; 2009.



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.



Modelo geotérmico preliminar de un área del Macizo Volcánico del Ruiz²⁹.



Modelo geotérmico conceptual del campo de Chinameca El Salvador³⁰.

²⁹ Fuente: ISAGEN 2011.

³⁰ 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>

Uno de los fines fundamentales de la construcción de un modelo geotérmico conceptual, además de la compilación de la información de los diferentes estudios, 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:

- a. ¿En la zona hay evidencias de fluidos geotérmicos en superficie, tales como: manantiales termales, alteraciones hidrotermales y un 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 que podrían proporcionar permeabilidad al subsuelo y 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 exploratorias 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?



5.2.8 Estudios ambientales

Una vez seleccionados los sitios de perforación y elaborado el diseño de los pozos, las plataformas y obras asociadas, como vías de acceso, campamentos y servicios auxiliares, se elabora el Estudio de Impacto Ambiental para la perforación exploratoria.

Dicho estudio debe incluir las actividades de pruebas del pozo, en caso de encontrar fluidos geotérmicos y el desmantelamiento de la perforación, si no arroja resultados positivos.

La gestión y obtención de la licencia ambiental para perforación exploratoria debe seguir el procedimiento establecido en el decreto 2820 de 2010, sobre licenciamiento ambiental, así como la Metodología General para la Presentación de Estudios Ambientales y el Manual para la Evaluación de Estudios Ambientales, del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible publicados en 2010.

Los aspectos de mayor relevancia que deben ser considerados para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental de la perforación exploratoria son:

- Diseño y localización de la plataforma de perforación. Se debe racionalizar el uso del espacio, minimizando longitud de vías de acceso y localizándolas en áreas de baja sensibilidad ambiental y bajo riesgo geológico.
- Realizar un programa de información y participación comunitaria para socializar el proyecto, resolver dudas, conocer las expectativas de la población y desmitificar las creencias de la comunidad con respecto a la tecnología de generación geotérmica.
- Aislar y proteger a receptores sensibles por niveles de ruido producidos por la perforación y tránsito de maquinaria pesada.
- Hacer un manejo adecuado de aguas residuales industriales, lodos de perforación y residuos sólidos.
- Uso de sistemas de control durante la perforación por flujos repentinos de fluidos geotérmicos o reventones desde el reservorio.

- Diseñar un plan de contingencia detallado para las actividades de perforación y para atender erupciones volcánicas, flujos de lodo ó avalanchas o "lahares" originados por movimientos telúricos.
- Diseñar e implementar un sistema de almacenamiento, reinyección o disposición de los fluidos geotérmicos usados para las pruebas de los pozos exploratorios.

5.3 Fase 3 - Factibilidad

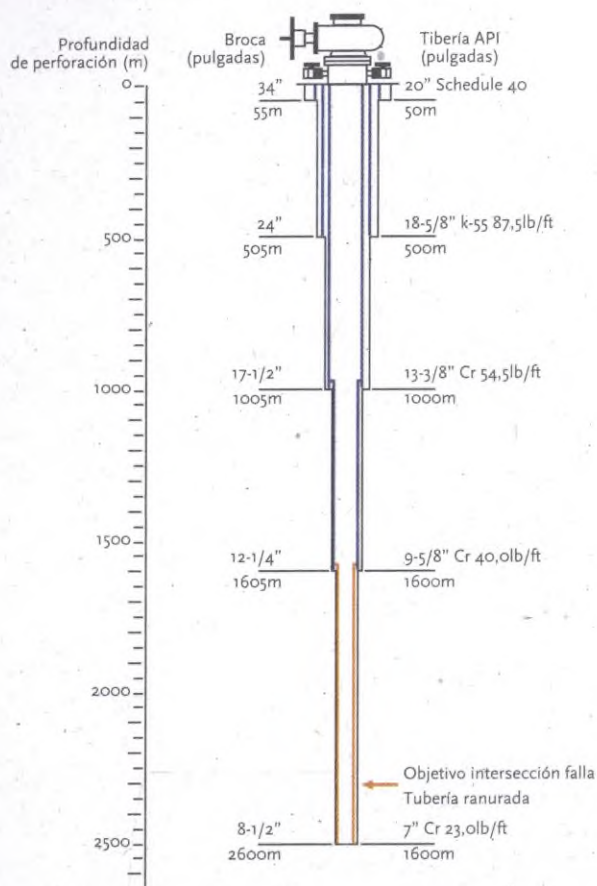
Esta Fase reviste especial importancia, pues las actividades a ejecutar tienen como objetivo principal comprobar la existencia del recurso geotérmico y evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental del desarrollo de un proyecto geotérmico. Se realiza una vez se han comprobado las hipótesis del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

5.3.1. Perforaciones exploratorias y evaluación del reservorio

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 típicamente entre uno (1) y cinco (5) kilómetros, de acuerdo con las características geológicas de la zona.

Generalmente los pozos son telescópicos, es decir, la perforación inicia en diámetros típicamente 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 producción futura de



Diseño de pozo exploratorio vertical tipo³¹.

Equipo de perforación exploratoria³².

³¹ Estudio de Prefactibilidad del Campo Geotérmico Macizo Volcánico del Ruiz; Convenio ISAGEN BID ATN/JC-12150-CO; 2012.

³² U.S. Geological Survey Department of the Interior/USGS U.S. Geological Survey. http://gallery.usgs.gov/images/01_21_2011/gkbn-1QP118_01_21_2011/large/Energy_Trip_058_2.jpg

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.

También se utilizan diferentes técnicas de perforación con brocas tricónicas, perforaciones corazonadas o perforaciones con aire a alta presión. El uso de una u otra técnica depende de la disponibilidad de equipos, el tipo de roca a perforar y su costo.

También es posible perforar pozos verticales o direccionales, estos últimos se usan cuando se quiere acceder a varios puntos del reservorio desde un mismo sitio en superficie o interceptar una falla o una formación geológica específica.



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, la conductividad hidráulica y productividad del pozo en términos del flujo de masa y de entalpía para producción de energía.

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 y los requerimientos de reinyección de fluidos.

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.

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.

5.3.2 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, los requerimientos de equipos, sistemas auxiliares, sistema de conducción de fluidos, conexión a la red y el desarrollo del campo mediante pozos de producción y reinyección.



Dimensionar la planta permitirá obtener un presupuesto estimado del desarrollo de la misma y el campo para realizar las evaluaciones financieras de viabilidad del proyecto. Para este análisis se deben tener en cuenta las siguientes variables:

Variables de interés para el desarrollo de una planta de generación geotermia:

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)
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 del fluido geotérmico y 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.
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.

Variable	Nota
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> $n = \frac{\dot{W}}{\dot{m} x E}$ <p>Donde:</p> <p>n: eficiencia en la conversión de energía W: potencia eléctrica entregada a la red m: flujo másico total del fluido geotérmico E: energía específica del geofluido en el yacimiento dada por:</p> $E = h(P_1 T_1) - (P_0 T_0) - T_0 (s(P_1 T_1) - s(P_0 T_0))$ <p>La entalpía específica h y la entropía s, son evaluadas bajo condiciones de yacimiento, P₁ y T₁, en el llamado estado estacionario. P₀ y T₀ corresponden al sitio en que está ubicada la planta. (ISAGEN - Fuentes No Convencionales de Energía - 2005).</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.





5.3.3 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:

- Localización y diseño de pozos de producción y reinyección.
- Diseño de pozos y líneas de conducción de fluidos.
- Diseño de vías de acceso y obras civiles.
- Diseño de la línea de conexión al Sistema Interconectado Nacional.
- Diseño de la planta, equipos y sistemas auxiliares.
- Elaboración de especificaciones y pliegos de licitación para construcción y suministro de equipos.
- Estructuración financiera.

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:

- Variaciones de temperatura y presión de los fluidos geotérmicos.
- Contenido de agua y vapor de los fluidos geotérmicos.
- Composición química de los fluidos geotérmicos.
- Incrustaciones y obstrucción de los pozos de producción o reinyección.
- 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.



Planta y campo geotérmico Berlín El Salvador. (109 MW)³³.

³³ Monitoring and field management: The Berlin Geothermal field case; Manuel Monterrosa et al; Short course on geothermal drilling, resource development and power plants; El Salvador, January 17-22, 2001.



6

Normas aplicables

para el desarrollo y aprovechamiento
de fuentes no convencionales de
energía en Colombia

Un aspecto importante para el desarrollo de proyectos geotérmicos es la revisión y evaluación del marco legal, el cual establece los requerimientos generales establecidos en la regulación Colombiana.

6.1 Convenios internacionales

Aspecto	Norma	Descripción
Colombia ratifica el Convenio Marco de ONU sobre Cambio Climático.	Ley 164 de 1994	Colombia ratifica la Convención Marco de ONU sobre Cambio Climático, la cual tiene por objetivo estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmosfera.
Colombia adopta el Protocolo de Kyoto.	Ley 629 de 2000	Colombia adopta el Protocolo de Kyoto Define reglamentación del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).
Factor de emisión de gases de efecto invernadero.	Resolución 181462 de 2004	Adoptar el factor de emisión de 0.471 kg CO ₂ /kWh para el cálculo de las reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero para los proyectos de generación de energía con fuentes no renovables (incluyendo geotérmica). Este factor se actualizará anualmente.

6.2 Uso racional de energía y fuentes no convencionales

Aspecto	Norma	Descripción
Ley de Uso Racional de Energía URE.	Ley 697 de 2001	Determina el Uso Racional y Eficiente de la Energía (URE) como asunto de interés social, público y de conveniencia nacional. Designa al Ministerio de Minas y Energía como la entidad responsable de promover, organizar, asegurar el desarrollo y seguimiento de los programas URE. Entre los objetivos se establece que el Ministerio debe promover el uso de energías no convencionales dentro del programa PROURE, estudiando la viabilidad tecnológica, ambiental y económica. Crea el programa PROURE. Ordena al Gobierno Nacional establecer los estímulos que permitan desarrollar en el país el uso racional y eficiente de la energía y las fuentes no convencionales.



Aspecto	Norma	Descripción
Reglamentación de Ley 697-2001.	Decreto 3683/2003	Reglamenta el uso racional y eficiente de la energía. Establece la Comisión Intersectorial para el uso racional y eficiente de la energía y Fuentes No Convencionales de energía (CIURE), con el fin de asesorar y apoyar al ministerio en políticas de uso racional y eficiente de energía y energía No convencional. Especifica lineamientos generales para el Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y demás Formas de Energía No Convencionales (PROURE).
Definición programas PROURE	Resolución 180609 de 2006	Define los subprogramas que hacen parte del programa PROURE.
Plan Energético Nacional (PEN) 2010 - 2030	Resolución 180919 de 2010.	Incluye las fuentes no convencionales de energía en la visión a largo plazo del sector eléctrico colombiano.
Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014	Ley 1450 de junio de 2011	Artículo 105. Energías Renovables. El Gobierno Nacional diseñará e implementará 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 carbono en los diferentes sectores y a establecer estímulos y alternativas para reducir su huella en nuestro país.

6.3 Incentivos tributarios para el desarrollo de fuentes no convencionales de energía

Aspecto	Norma	Descripción
Renta Exenta por 15 años.	Ley 788 de 2002, Art. 18	Exención de rentas durante 15 años por venta de energía eléctrica obtenida a partir de biomasa, viento y residuos agrícolas siempre y cuando: a. Tramiten, obtengan y vendan Certificados de Reducción de Emisiones de dióxido de carbono de acuerdo con los términos del Protocolo de Kyoto y b. Se invierta el 50% de los ingresos por este concepto en obras de beneficio social.
Descuento tributario IVA.	Estatuto Tributario, Art. 428-i	Exención de IVA a importaciones de maquinaria y equipos para proyectos que sean exportadores de certificados de reducción de emisiones de carbono y que contribuyan a reducir la emisión de gases efecto invernadero y por lo tanto al desarrollo sostenible. Debe obtenerse una certificación por autoridad competente (Ministerio del Medio Ambiente).

Aspecto	Norma	Descripción
Exclusión de IVA para equipos de control y monitoreo ambiental.	Estatuto Tributario, Art. 424-5.4. y	Quedan excluidos del impuesto sobre las ventas los siguientes bienes: Los equipos y elementos nacionales o importados que se destinen a la construcción, instalación, montaje y operación de sistemas de control y monitoreo, necesarios para el cumplimiento de las disposiciones, regulaciones y estándares ambientales vigentes, para lo cual deberá acreditarse tal condición ante el Ministerio del Medio Ambiente. Los equipos para el control y monitoreo ambiental, incluidos aquellos para cumplir con los compromisos del Protocolo de Montreal.
Estabilidad Jurídica.	Estatuto Tributario, Art. 428-f y Resolución 486 de 2002 y Ley 223 de 1995 y Decreto 2532 de 2001	Contratos de Estabilidad Jurídica - Pactar con el Gobierno permanencia durante la vigencia del contrato, de disposiciones legales y reglamentarias que existan al momento de realizar la inversión, y que tengan aplicación favorable para la Empresa. La vigencia no podrá ser superior a 20 años (Art. 6). Este tipo de contrato le aplica a las actividades de generación de energía eléctrica. La celebración de estos contratos genera la obligación de pagar una prima igual al 1% del valor de la inversión realizada cada año, pero si la inversión contempla un período improductivo el monto de la prima será del cero punto cinco 0.5% del valor de la inversión.
Reglamentación de exención de renta.	Ley 963 de 2005, Art. 1,5,6	Reglamenta el artículo 207-02 de esta ley en donde se establece la exención de renta por un período de 15 años, contados a partir de enero 1 de 2003.
Deducción de inversiones en desarrollo científico y tecnológico.	Decreto 2755/2003	Deducción del 125% del impuesto de renta del valor invertido en el período gravable en que se realizó la inversión. Esta deducción no podrá exceder del 20% de la renta líquida, determinada antes de restar el valor de la inversión. Aplica a proyectos de carácter científico, tecnológico o de innovación tecnológica reconocidos por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Estos beneficios también aplican a donaciones a centros de investigación, desarrollo tecnológico o centros y grupos de investigación de instituciones de educación superior. Requiere evaluación del impacto ambiental por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
Descuento tributario IVA para maquinaria pesada.	Ley 633 de 2000, Art. 158-1	Cuando la maquinaria importada tenga un valor CIF superior a quinientos mil dólares (USD 500.000.00), el pago del IVA podrá realizarse de la siguiente manera: 40% con la declaración de importación y el saldo en dos (2) cuotas iguales dentro de los dos años siguientes. El valor del impuesto sobre las ventas, podrá descontarse del impuesto sobre la renta, correspondiente al período gravable en el que se haya efectuado el pago y en los períodos siguientes. Aplica a las industrias básicas entre las cuales se encuentra la generación y transmisión de energía eléctrica.



Aspecto	Norma	Descripción
Deducción por inversiones en control y mejoramiento del Medio ambiente.	Estatuto Tributario, Art. 258-2	Deducción del 100% del valor de las inversiones que se realicen en control y mejoramiento del medio ambiente en el respectivo año gravable. No podrá ser superior al 20% de la renta líquida, determinada antes de restar el valor de la inversión. No podrán deducirse el valor de las inversiones realizadas por mandato de una autoridad ambiental para mitigar el impacto ambiental producido por la obra o actividad objeto de una licencia ambiental.
Deducción especial por adquisición de activos fijos reales Productivos	Estatuto Tributario, Art. 158-2	Deducción del 40% del valor de las inversiones efectivas realizadas solo en activos fijos reales productivos adquiridos, aun bajo la modalidad de leasing financiero con opción irrevocable de compra. Este beneficio no posee limitación con respecto a la renta líquida del contribuyente y podrá utilizarse en forma permanente. Definición activo fijo real productivo: bienes tangibles que se adquieren para formar parte del patrimonio, participan de manera directa y permanente en la actividad productora de renta del contribuyente y se deprecian o amortizan fiscalmente.

6.4 Normas ambientales

Aspecto	Norma	Descripción
Definición de Licencia Ambiental.	Ley 99 de 1993, Art. 50	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.
Licencia Ambiental.	Ley 99 de 1993, Art. 57. y Decreto 883 de 1997, Art. 4 y 5	Se entiende por Estudio de Impacto Ambiental el conjunto de la información que deberá presentar ante la autoridad ambiental competente el peticionario de una Licencia Ambiental. El Estudio de Impacto Ambiental contendrá información sobre la localización del proyecto, y los elementos abióticos, bióticos y socioeconómicos del medio que puedan sufrir deterioro por la respectiva obra o actividad, para cuya ejecución se pide la licencia, y la evaluación de los impactos que puedan producirse. Además, incluirá el diseño del plan de manejo ambiental y los planes de prevención, mitigación, corrección y compensación de impactos y el plan de manejo ambiental de la obra o actividad. La autoridad ambiental competente para otorgar la Licencia Ambiental fijará los términos de referencia de los estudios de impacto ambiental en un término que no podrá exceder de 60 días hábiles contados a partir de la solicitud por parte del interesado.

Aspecto	Norma	Descripción
Promover el desarrollo de generación que sustituya el uso de recursos no renovables.	Ley 99 de 1993, Art. 5, numeral 33	Asigna al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial promover la realización de programas de sustitución de recursos naturales no renovables para el desarrollo de tecnologías de generación de energías no contaminantes ni degradantes
Diagnóstico Ambiental de Alternativas (DAA).	Ley 99 de 1993, Art. 56. Se reglamenta a través del Decreto 2820	<p>En los proyectos que requieran Licencia Ambiental, el interesado deberá solicitar en la etapa de factibilidad a la autoridad ambiental competente, que ésta se pronuncie sobre la necesidad de presentar o no un Diagnóstico Ambiental de Alternativas. Con base en la información suministrada, la autoridad ambiental decidirá sobre la necesidad o no del mismo y definirá sus términos de referencia en un plazo no mayor de 30 días hábiles.</p> <p>El Diagnóstico Ambiental de Alternativas incluirá información sobre la localización y características del entorno geográfico, ambiental y social de las alternativas del proyecto, además de un análisis comparativo de los efectos y riesgos inherentes a la obra o actividad, y de las posibles soluciones y medidas de control y mitigación para cada una de las alternativas.</p> <p>Con base en el Diagnóstico Ambiental de Alternativas presentado, la autoridad elegirá, en un plazo no mayor de 60 días, la alternativa o las alternativas sobre las cuales deberá elaborarse el correspondiente Estudio de Impacto Ambiental antes de otorgarse la respectiva licencia.</p>
Competencia del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Decreto 2820 de 2010	<p>En el sector eléctrico:</p> <ol style="list-style-type: none"> La construcción y operación de centrales generadoras de energía eléctrica con capacidad instalada igual o superior a 100 MW Los proyectos de exploración y uso de fuentes de energía alternativa virtualmente contaminantes; 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 KW.
Competencia de las Corporaciones Autónomas Regionales para otorgar licencia ambiental.	Decreto 2820 de 2010.	<p>En el sector eléctrico:</p> <ol style="list-style-type: none"> La construcción y operación de centrales generadoras con una capacidad mayor o igual a 10 MW y menor de 100 MW; El tendido de líneas del sistema de transmisión conformado por el conjunto de líneas con sus equipos asociados, que operan a tensiones menores de 220 KV y que no pertenecen a un sistema de distribución local.
Participación de la comunidad.	Decreto 2820 de 2010.	En los casos que se requiera, deberá darse cumplimiento a lo dispuesto en el artículo 76 de la Ley 99 de 1993, en materia de consulta previa con comunidades indígenas y negras tradicionales y al Decreto 1320 de 1998 o al que lo sustituya o modifique.

Aspecto	Norma	Descripción
El Ministerio de Salud o la EMAR podrán exigir un estudio de impacto ambiental:	Decreto 1594/1984, Art. 151	Se podrá exigir prioritariamente la presentación de un estudio de efecto ambiental o impacto ambiental en proyectos de generación de energía y embalses.

6.5 Código de recursos naturales renovables

Aspecto	Norma	Descripción
Definición de recursos geotérmicos.	Decreto 2811/1974, Art. 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.
Los recursos geotérmicos que no alcancen los 80 grados centígrados serán considerados aguas termales.	Decreto 2811/1974, Art. 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.
Factor de emisión de gases de efecto invernadero.	Resolución 181462 de 2004	Sin perjuicio de derechos adquiridos, la nación se reserva el dominio de los recursos geotérmicos.
Entre los usos para recursos geotérmicos se incluye la producción de energía.	Decreto 2811/1974, Art. 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.
La concesión de uso de aguas será otorgada con la concesión de recurso geotérmico.	Decreto 2811/1974, Art. 176	La concesión de uso de aguas para explotar una fuente geotérmica será otorgada con la concesión del recurso geotérmico.

Aspecto	Norma	Descripción
El concesionario de recursos geotérmicos estará a cargo de tomar medidas para evitar contaminación de aguas o vapores.	Decreto 2811/1974, Art. 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.

6.6 Usos del agua

Aspecto	Norma	Descripción
El Estado es propietario del subsuelo.	Constitución Nacional Artículo 332	El Estado es propietario del subsuelo y de los recursos naturales no renovables, sin perjuicio de los derechos adquiridos y perfeccionados con arreglo a las leyes preexistentes.
Concesión de Aguas.	Decreto 2811/1974, Art. 88	Salvo disposiciones especiales, solo puede hacerse uso de las aguas en virtud de concesión.
Agua son de dominio público.	Decreto 2811/1974, Art. 80	Sin perjuicio de los derechos privados adquiridos con arreglo a la ley, las aguas son de dominio público, inalienables e imprescriptibles.
La Nación se reserva la propiedad de aguas minerales y termales.	Decreto 2811/1974, Art. 85	Salvo los derechos adquiridos, la nación se reserva la propiedad de aguas minerales y termales y su aprovechamiento se hará según lo establezca el reglamento
Corresponde al gobierno autorizar y controlar el aprovechamiento de aguas.	Decreto 2811/1974, Art. 155	Corresponde al gobierno: Autorizar y controlar el aprovechamiento de aguas y la ocupación y explotación de los cauces; Coordinar la acción de los organismos oficiales y de las asociaciones de usuarios, en lo relativo al manejo de las aguas; Reservar las aguas de una o varias corrientes, o parte de dichas aguas; Ejercer control sobre uso de aguas privadas, cuando sea necesario para evitar el deterioro ambiental o por razones de utilidad pública e interés social, y las demás que contemplen las disposiciones legales.
Clasificación de uso de agua para generación de energía.	Decreto 1594/1984, Art. 35	Se entiende por uso agrícola del agua su empleo en actividades de generación de energía.
Cobro de tasas por utilización de agua.	Ley 99 de 1993 Art. 43	La utilización de aguas por personas naturales o jurídicas, públicas o privadas, dará lugar al cobro de tasas fijadas por el Gobierno Nacional que se destinarán al pago de los gastos de protección y renovación de los recursos hídricos, para los fines establecidos por el artículo 159 del Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, Decreto 2811 de 1.974. El Gobierno Nacional calculará y establecerá las tasas a que haya lugar por el uso de las aguas.



6.7 Código de minas

Aspecto	Norma	Descripción
Definición de contrato de concesión minera	Ley 685 de 2001 (Código de Minas), Art. 45 y Ley 1382 de 2010	El contrato de concesión minera es el que se celebra entre el Estado y un particular para efectuar, por cuenta y riesgo de este, los estudios, trabajos y obras de exploración de minerales de propiedad estatal que puedan encontrarse dentro de una zona determinada y para explotarlos en los términos y condiciones establecidos en este Código. Este contrato es distinto al de obra pública y al de concesión de servicio público. El contrato de concesión comprende dentro de su objeto las fases de exploración técnica, explotación económica, beneficio de los minerales por cuenta y riesgo del concesionario y el cierre o abandono de los trabajos y obras correspondientes.



7

Retos

para el desarrollo de la
geotermia en Colombia



Capacitación
Apoyo
financiero
Confiabilidad
firmeza
Comunidad
infraestructura

- El aprovechamiento de la geotermia requiere contar con el apoyo de consultoría especializada, ya que su desarrollo demanda estudios exhaustivos para la caracterización y modelamiento del recurso.
- El País cuenta con una capacidad técnica y científica limitada para el desarrollo del recurso geotérmico, razón por la cual se requiere implementar planes y programas de capacitación a nivel técnico-científico en las diferentes disciplinas requeridas.
- Las etapas preliminares de exploración implican cuantiosas inversiones, con un alto nivel de riesgo y por tanto, requieren de apoyo financiero o el acceso a mecanismos que permitan realizar la cobertura de riesgo respectiva.
- Las áreas con potencial geotérmico se localizan en zonas volcánicas, con infraestructura limitada para el acceso y la conexión al Sistema de Transmisión Nacional (STN), por lo cual es necesario realizar inversiones cuantiosas de manera adicional al desarrollo geotérmico.
- Los costos de exploración de la geotermia y la instalación de la infraestructura requerida para la generación de energía eléctrica son altos, lo cual puede dificultar su ingreso y competitividad en el mercado.
- No se cuenta con una normatividad específica para el desarrollo geotérmico, por lo cual se requiere realizar ajustes a la normatividad vigente, para permitir el desarrollo y el aprovechamiento del recurso geotérmico de una manera armónica y ordenada.
- Se requiere adecuar la regulación del mercado de energía, de manera que se reconozcan los aportes de la geotermia a la confiabilidad y firmeza del sistema eléctrico.
- Es importante capacitar a la comunidad, con el objeto dar a conocer los beneficios y los riesgos reales asociados al uso del recurso geotérmico.



Bibliografía

- 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 Baer Thermal Area of Western Iceland: Exploration and Exploitation". Transactions, Vol. 5, Geothermal Resources Council, Davis, CA, pp. 511-514.

GonzalesRubio, 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.

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.

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.

Notas para la investigación y desarrollo de
proyectos geotérmicos en Colombia/Isagen

333.794 I74n Ej. 1

CATALOGADO POR: HELP FILE LTDA

FECHA

PRESTADO A

FECHA
DEVUELTO

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA



01007327

BIBLIOTECA

www.isagen.com.co

Septiembre 2012

SUPERSEVICIOS SP
NIT. 91150705-4

