

LA ENERGIA GEOTERMICA: POSIBILIDADES DE DESARROLLO EN CHILE

Alfredo Lahsen Azar

Departamento de Geología Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas

Universidad de Chile.

ANTECEDENTES GENERALES

Origen y distribución de los Recursos Geotérmicos

Los recursos geotérmicos provienen del calor natural de la Tierra, cuyo flujo promedio mundial es de 82 mW/m^2 , el cual corresponde a un flujo de 99 mW/m^2 en los fondos oceánicos y a 57 mW/m^2 en los continentes (Uyeda, 1988). Este calor natural se manifiesta normalmente en el aumento de la temperatura con la profundidad; este es el gradiente geotérmico que en promedio, a nivel, mundial es del orden de 30° C/Km . De acuerdo con esto, a 2.000 m de profundidad se tendría una temperatura de $60\text{-}70^\circ \text{C}$, lo cual es bastante poco significativo como energía utilizable. Sin embargo, en ciertas regiones de la tierra se presentan flujos calóricos o gradientes geotérmicos mucho mayores que el normal; el calor natural de tales regiones constituye la Energía Geotérmica y está generalmente asociada con actividad sísmica y volcánica.

La tectónica global de placas ofrece una excelente explicación acerca del confinamiento, en zonas o franjas claramente definidas, de los focos sísmicos, las anomalías del flujo calórico y la actividad volcánica. Estas zonas, a su vez coinciden en la mayoría de los casos con los márgenes generativos o destructivos de placas litosféricas (Fig. 1). Una de las zonas más importantes a este respecto sigue aproximadamente los márgenes del Océano Pacífico, en la cual se encuentran cerca del 60% de los volcanes del mundo.

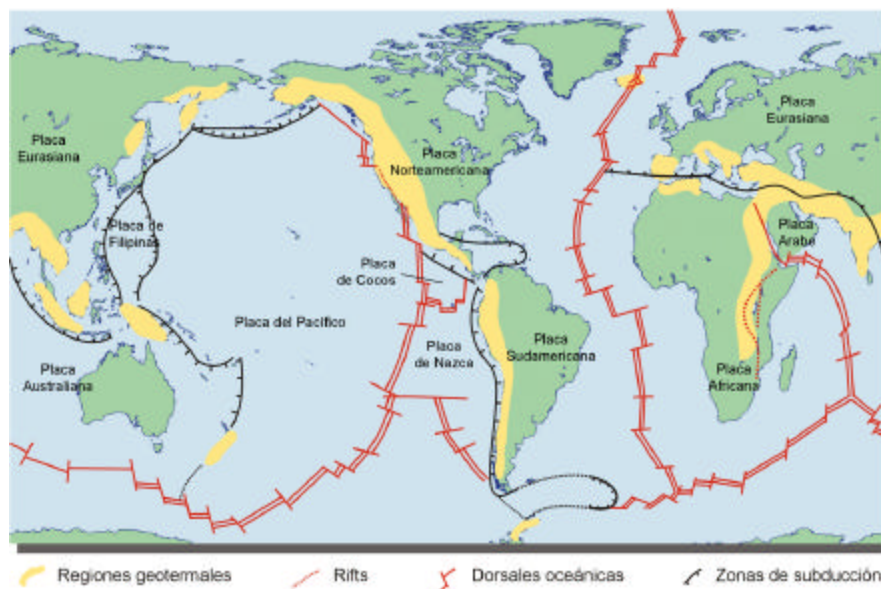


Fig. 1. Distribución de las principales placas corticales

Estructura de los Sistemas Geotérmicos

Los antecedentes aportados por las investigaciones geológicas, geofísicas y geoquímicas de una gran cantidad de sistemas geotérmicos permiten construir un modelo básico de la estructura de estos sistemas (Fig. 2). Aún cuando cada sistema difiera en cierta medida de los otros, su ocurrencia está condicionada por los siguientes factores básicos:

- **Fuente de Calor:** Corresponde generalmente a un cuerpo de magma a unos 600-900°C emplazado a menos de 10 km de profundidad, desde el cual se trasmite el calor a las rocas circundantes.
- **Recarga de agua:** El agua meteorica o superficial debe tener la posibilidad de infiltrarse en el subsuelo, a través de fracturas o rocas permeables, hasta alcanzar la profundidad necesaria para ser calentada.
- **Reservorio:** Es el volumen de rocas permeables a una profundidad accesible mediante perforaciones, donde se almacena el agua caliente o el vapor, que son los medios para utilizar el calor.
- **Cubierta impermeable:** Impiden el escape de los flúidos hacia el exterior del sistema, usualmente corresponde a rocas arcillosas o a la precipitación de sales de las mismas fuentes termales.

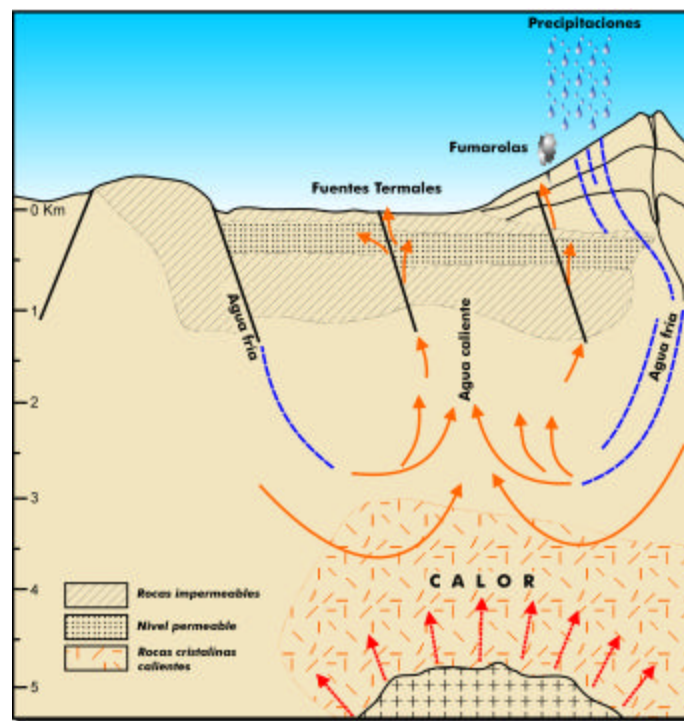


Fig. 2. Modelo de sistema geotérmico indicando los principales factores que lo controlan

Tipos de sistemas geotérmicos

De acuerdo, principalmente con la recarga del agua y la estructura geológica del sistema, estos pueden dividirse en:

Sistemas de agua caliente: Cuyos reservorios contienen agua a temperaturas entre 30 y 100°C. Sistemas de este tipo son utilizados en la actualidad para calefacción y agroindustria principalmente.

Sistemas de agua - vapor: Denominados también de vapor húmedo, contienen agua bajo presión a temperaturas superiores a 100°C. Este tipo de sistemas geotérmicos es el más común y de mayor explotación en la actualidad, pueden alcanzar temperaturas de hasta 350°C (Cerro Prieto, México).

Sistemas de vapor seco: O de vapor dominante, producen vapor sobrecalentado, la separación de la fase gaseosa se produce dentro del reservorio; el grado de sobrecalentamiento puede variar entre 0 y 50°C. Estos sistemas son poco comunes; como ejemplos de ellos se tienen Larderello y Monte Amiata (Italia), The Geysers (California) y Matsukawa (Japón).

Sistemas de rocas secas calientes: Corresponden a zonas de alto flujo calórico, pero impermeables de tal modo que no hay circulación de fluidos que pueden transportar el calor. En Estados Unidos se ha desarrollado un proyecto con el objeto de crear artificialmente el reservorio al cual se le podría introducir agua fría y recuperar agua caliente o vapor (Los Alamos, Nuevo México).

Utilización de los recursos geotérmicos

Desde la antigüedad las fuentes termales han sido utilizadas como baños, especialmente por sus posibles efectos medicinales. Algunos pueblos también las utilizaron para obtener agua potable a partir de los condensados del vapor, y para cocer sus alimentos; los minerales asociados a la actividad hidrotermal como el azufre, los travertinos, los caolines, las limonitas y óxidos de hierro fueron tradicionalmente extraídos de estas fuentes.

Sin embargo, el descubrimiento de sales de Boro en las manifestaciones termales de Larderello (Italia) a fines del siglo XVIII, marcó el inicio de la utilización industrial de los recursos geotérmicos. La industria del ácido bórico que se inicia en 1812, dió paso por primera vez en 1904 a la generación de electricidad a partir del vapor geotérmico. En 1913 se pone en funcionamiento una central de 250 kW; desde entonces Italia ha ido incrementando su capacidad hasta alcanzar, en 1995, una potencia instalada de 632 MW.

Alrededor de 1920 se hicieron pozos exploratorios en: Beppu (Japón) donde en 1924 se instaló una planta experimental de 1 kW; en The Geysers y Niland (California) proyecto que fue abandonado por falta de mercado para la electricidad; en El Tatio (Chile) donde se perforaron 2 pozos hasta unos 60 m. de profundidad, este proyecto fue abandonado por problemas financieros. En la década del 30 se efectuaron perforaciones en Reykjavik y Reykim (Islandia)

donde el agua caliente captada se empezó a utilizar para calefacción ambiental. Con este mismo objeto se hicieron los primeros sondajes en 1940, en Rotorúa (Nueva Zelanda).

A partir de la década de los 60 se inicia, en diversas partes del mundo, una intensa actividad de investigación y exploración de los recursos geotérmicos, con el objeto de utilizarlos ya sea como energía calórica o bien para la generación de electricidad. Es así como en 1995 la capacidad instalada de plantas geotermoeléctricas alcanzaba a 6.790 Mwe, (Huttrer, 1995) proyectándose para el año 2000 una capacidad de 9.960 Mwe (Tabla 1). En cuanto a usos directos de la energía geotérmica, ya sea para calefacción, procesos industriales o agropecuarios, alcanzaba según Freeston, 1995, a una magnitud equivalente a 8.300 Mwt. (Tablas 2 y 3).

Tabla 1. Centrales Geotermoeléctricas

PAIS	AÑO INICIO	CAPACIDAD INSTALADA	
		1995	2000
Argentina	1988	0,67	S/inf.
Austria	1992	0,17	S/inf.
China	1977	28,78	81
Costa Rica	1994	55	170
El Salvador	1975	105	165
Filipinas	1978	1227	1978
Francia	1984	4,2	S/inf.
Indonesia	1981	309,75	1080
Islandia	1969	49,4	S/inf.
Italia	1912	641,7	600
Kenia	1981	45	S/inf.
México	1973	753	960
Nueva Zelanda	1960	286	440
Nicaragua	1988	35	S/inf.
Portugal	1987	5	S/inf.
Rusia	1967	11	110
Tailandia	1989	0,3	S/inf.
Turquía	1975	20,6	125
USA	1960	2816,7	3395
		6.797,98	9.960

Tabla 2. Usos directos de energía geotérmica (Total 105.671 TJ/Año)

Calefacción Ambiental	33%
Baños Termales	15%
Acuicultura	13%
Invernaderos	12%
Aire Acondicionado	12%
Industria	11%
Secado productos agrícolas	1%
Otros	3%

Tabla 3. Usos directos de energía geotérmica (año 1995)

PAIS	FLUJO (l/seg.)	Mwt	TJ/año
Argelia	550	100	16,57
Austria	173	19,5	184,0
Bélgica	57,9	3,9	101,6
China	8.628	1915	16.981
Dinamarca	44,3	3,5	45
Francia	2.971	337	3.190
Georgia	1.363	245	7.689
Grecia	242	23,2	133
Guatemala	12	2,64	83
Hungría	1.714	340	5.861
Islandia	5.794	1443	21.158
Israel	1.217	44,2	1.196
Italia	1.612	307	3.629
Japón	1.610	318	6.978
Macedonia	761	69,5	509,6
Nueva Zelanda	353	264	6.614
Polonia	298	63	740
Rumanía	300	130	1.230
Rusia	1.240	210	2.422
Serbia	892	80	2.375
Slovakia	353	99,7	1.808
Slovenia	573	39,1	780
Suecia	455	47	960
Suiza	120	110	3.470
Turquía	700	140	1.987
USA	3.905	1.874	13.890
TOTAL	35.998	8.228	105.671

EXPLORACION GEOTERMICA EN CHILE

Las exploraciones geotérmicas en Chile se iniciaron en 1968 como resultado de un convenio suscrito entre el Gobierno de Chile y el PNUD. Para llevar a cabo este convenio la CORFO creó el Comité para el Aprovechamiento de la Energía Geotérmica, y cuya función fundamental fue “programar, dirigir y realizar investigaciones y trabajos en las zonas que existan recursos geotérmicos, encaminados a establecer las posibilidades más adecuadas de explotación de los mismos”. Como una primera etapa de los estudios, las exploraciones se restringieron a las Regiones de Tarapacá y Antofagasta por ser éstas las más deficitarias en recursos energéticos e hídricos del país. Los escasos recursos hidráulicos disponibles han sido en su totalidad empleados y las exploraciones petrolíferas llevadas a cabo en estas regiones han sido desfavorables. Consecuentemente, las necesidades de energía eléctrica han debido ser suplidas mediante centrales térmicas convencionales; además de la energía, existe la limitante de la falta de agua para cualquier expansión industrial o minera en la región.

Aparte de los estudios llevados a cabo mediante el proyecto CORFO-PNUD, que estuvo vigente hasta 1976, el conocimiento que actualmente se tiene acerca de las posibilidades de energía geotérmica de Chile se basa en los estudios volcanológicos y geoquímicos de numerosas áreas

termales, realizados por investigadores del Departamento de Geología de la Universidad de Chile y del SERNAGEOMIN.

De acuerdo con los estudios realizados queda de manifiesto que las áreas con actividad geotermal se encuentran asociadas a la franja volcánica del Plioceno-Holoceno que se extiende a lo largo de la Cordillera de los Andes, lo cual demuestra que la fuente de calor que da origen a las áreas termales corresponde a la actividad magmática. Tanto la actividad magmática como la actividad sísmica y en gran medida el flujo calórico en el territorio de Chile, están controlados por los procesos de subducción de la Placa de Nazca bajo el margen occidental del continente. (Lahsen, 1988).

Las principales áreas con actividad termal reconocidas que aparecen en la Fig. 3 incluyen fuentes termales cuya temperatura en superficie va desde los 30°C, hasta geiseres y fumarolas, cuya temperatura puede incluso sobrepasar el punto de ebullición local. Areas de manifestaciones termales inferiores a 30°C no han sido consideradas, aún cuando la temperatura media anual, en algunos sectores, es del orden de 0°C, como ocurre en la alta Cordillera del Norte de Chile. (Lahsen, 1985).

Areas Termales del norte de Chile

En la zona Norte se han realizado estudios geológicos y geoquímicos en una veintena de áreas con actividad termal ubicadas entre los 18° y 24° S estas áreas incluyen fuentes termales de hasta 86°C, correspondiente al punto de ebullición para una altura de unos 4.000 m s.n.m., donde se encuentran ubicadas la mayoría de ellas (Fig. 3). Algunas de estas áreas se extienden por varios km², con una gran cantidad de manifestaciones y una notable alteración hidrotermal en las rocas adyacentes.

Las aguas de las fuentes termales, en su gran mayoría corresponden a soluciones cercanamente neutras del tipo cloruradas, con contenidos variables de SiO₂, Na, K, Ca, Mg y cantidades menores pero apreciables de Li, Cs, As y B, además de sulfatos y carbonatos (Lahsen, 1976). Mediante geotermómetros químicos basados principalmente en el contenido de SiO₂ y en los cationes Na - K - Ca se han determinado temperaturas mínimas de subsuperficie que varían entre 180° y 250°C para los sistemas geotérmicos de Suriri, Puchuldiza, Pampa Lirima y El Tatio, en este último la temperatura máxima registrada en pozos fué de 276°C (Lahsen y Trujillo, 1975).

Las áreas termales del Norte de Chile donde se han realizado las investigaciones sistemáticas más avanzadas, corresponden al El Tatio y Puchuldiza alcanzando hasta la etapa de perforación de pozos exploratorios. En el caso específico de El Tatio se alcanzó, en 1976, la etapa de estudios de factibilidad para la instalación de una primera central geotermoeléctrica de 20MW, y además se realizaron pruebas de desalinización del agua termal mediante una planta piloto. Como resultado de esta se concluyó que era posible producir como producto 10 l/seg de agua potable por cada MW de potencia eléctrica que se instalase.

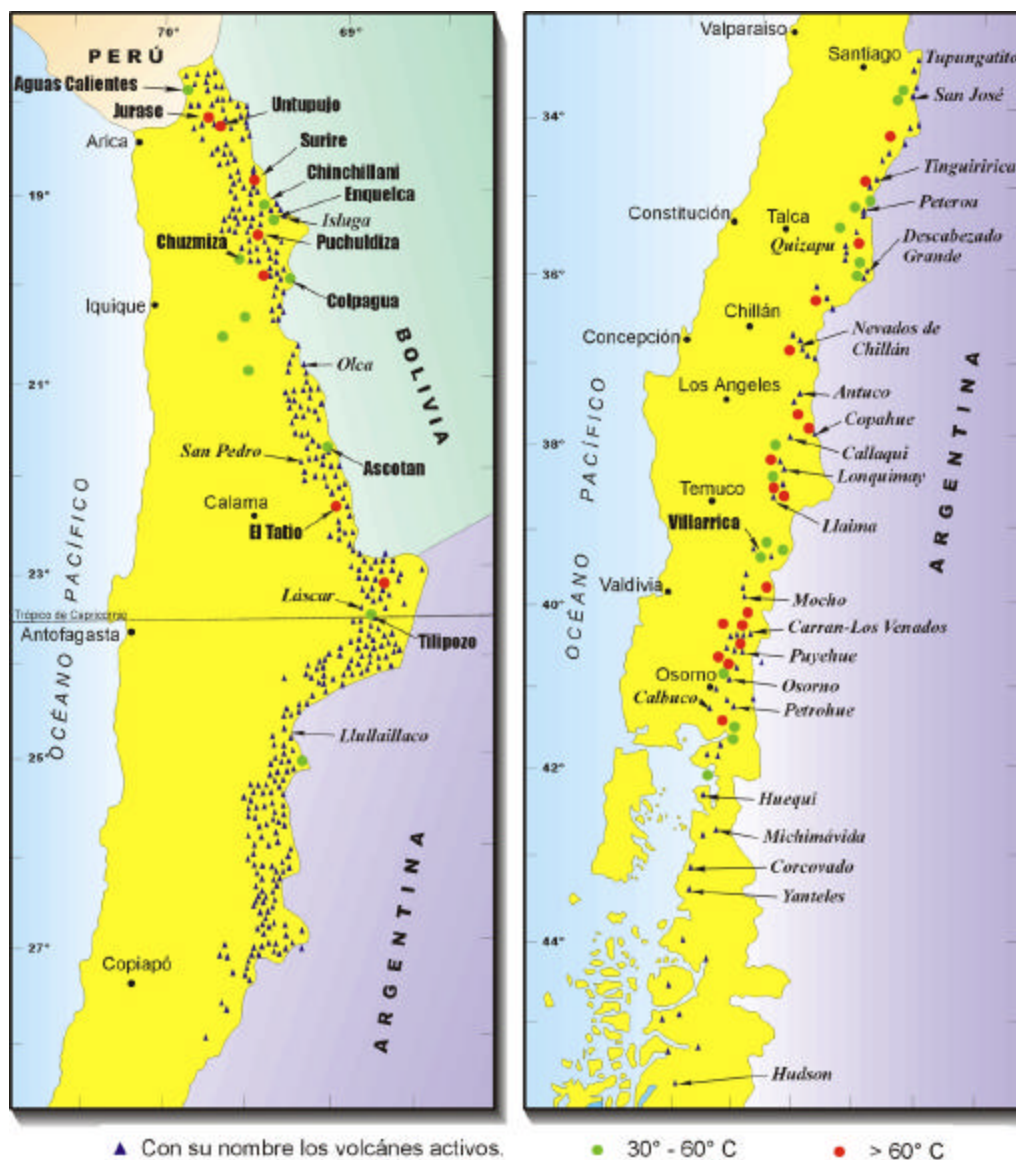


Fig. 3. Localización de volcanes cuaternarios y áreas de manifestaciones termales con indicación de sus temperaturas en superficie.

Áreas termales del centro - sur de Chile

En la zona central se conoce una gran cantidad de áreas termales con manifestaciones a temperaturas mayores de 30°C, de ellas, al menos la mitad sobrepasan los 60°C alcanzando en varios casos el punto de ebullición. Normalmente las áreas de manifestaciones termales de mayor temperatura se encuentran ubicadas en las cercanías de centros volcánicos activos; a pesar de ello, la composición química de sus aguas no siempre muestra un aporte significativo e fluidos de origen magmático. De las aguas termales analizadas de esta zona, aquellas asociadas a los volcanes Chillán, Copahue, Puyehue y Cordón de Caulle corresponden, entre otras, al tipo ácidasulfatadas lo cual refleja un aporte significativo de H₂S magmático a tales aguas (Lahsen, 1985).

En las áreas termales de mayor temperatura, aparte de aquellas ácido-sulfatadas, predominan las aguas cloruradas y cloro-sulfatadas y en menor proporción las aguas carbonatadas; en forma adicional, incluyen contenidos variables de SiO₂ y Na, K, Ca y Mg principalmente.

INVESTIGACIONES EN CURSO

A partir de diciembre de 1999 se ha iniciado un proyecto de tres años, denominado *“Caracterización y Evaluación de los Recursos Geotérmicos de la Zona Central-Sur de Chile: Posibilidades de Uso en Generación Eléctrica y Aplicaciones Directas”*, el cual es financiado por el Programa FONDEF de CONICYT. Este proyecto es llevado a cabo por el Departamento de Geología de la Universidad de Chile en colaboración con la Empresa Nacional del Petróleo y con el apoyo del Instituto Internacional de Investigaciones Geotérmicas de Italia, del Instituto de Geología General y Aplicada de la Universidad de Munich (Alemania) y del Instituto Geotermal de la Universidad de Auckland (Nueva Zelandia).

Para llevar a cabo este proyecto se cuenta con académicos y tesisas del Departamento de Geología de la Universidad de Chile y especialistas y profesionales de las distintas instituciones colaboradoras. El Director General del Proyecto es el Prof. Alfredo Lahsen y el Director Alterno el Prof. Carlos Palacios.

Los objetivos de este proyecto son los siguientes:

- Determinar la potencialidad de energía geotérmica en la zona central-sur de Chile.
- Establecer las posibilidades de utilización del recurso, de acuerdo con sus características físicas y químicas.
- Seleccionar las áreas más promisorias como para ser utilizadas con fines eléctricos y desarrollar en ellas los estudios de detalle necesarios.
- Formar especialistas en investigación de recursos geotérmicos necesarios para transferir los conocimientos científicos y tecnológicos.

POSIBILIDADES DE UTILIZACION EN CHILE

Los antecedentes disponibles a la fecha muestran claramente la estrecha relación existente entre áreas geotermales y magmatismo reciente evidenciado por la actividad volcánica a lo largo de la Cordillera de los Andes. Es por ello que resulta esencial para la estimación del potencial de energía geotérmica de una zona, conocer la distribución y naturaleza del volcanismo reciente y de las áreas de fuentes termales asociadas.

Para la utilización de energía geotérmica con fines prácticos se requiere la conjunción de una serie de factores: geológicos (o físicos), tecnológicos, económicos, sociales e incluso políticos, los cuales condicionan la posibilidad de explotar esta energía en una determinada zona.

Entre los factores geológicos o físicos es necesario considerar la distribución de la temperatura en profundidad, la permeabilidad de las rocas, el estado físico (agua o vapor) de los fluidos, el factor de recuperación de los mismos y la profundidad a la cual las perforaciones podrían captarlos. Los factores tecnológicos conciernen a la perforación de pozos y extracción de los fluidos y, a su posterior transporte y utilización. Los factores económicos, sociales y políticos dicen relación con el valor económico y social de las distintas aplicaciones de la energía geotérmica, la disponibilidad local de otras fuentes energéticas alternativas y el tipo de política energética nacional.

De acuerdo con los estudios realizados a la fecha, efectivamente existen en Chile recursos geotérmicos susceptibles de ser utilizados ya sea en la generación de electricidad o bien, para ser empleados en forma directa en diversos tipos de aplicaciones. Sin embargo, para lograr un desarrollo y aplicación de este recurso es necesario llevar a cabo programas de investigación tendientes a su localización, caracterización y evaluación.

Usos Eléctricos

Para la generación de electricidad la tecnología actualmente existente permite la utilización de fluidos de hasta 100°C mediante equipos de ciclo binario; fluidos sobre los 150°C pueden ser utilizados en plantas geotermoeléctricas convencionales. También en la actualidad pueden resultar competitivas pequeñas centrales geotermoeléctricas para abastecer comunidades rurales aisladas, para tal efecto existen mini centrales de 35 a 1.000 kW de potencia.

Usos no Eléctricos

De acuerdo con (Lindal, 1973) los sistemas geotermales con aguas a temperaturas inferiores a 100°C pueden ser desarrolladas con el objeto de darles diversos usos, entre los cuales es posible señalar los siguientes:

- Calefacción urbana y balnearios, que con el desarrollo económico del país podrían ser instaladas en áreas accesibles y en rutas internacionales.
- Invernaderos, para el cultivo de hortalizas y/o flores.
- Acuicultura, para la crianza de peces, por ejemplo truchas y salmones y, para crustáceos.
- Secado de productos agrícolas, ya sean granos, heno o frutas.

Usos Industriales: Los recursos geotérmicos también ofrecen diversas posibilidades de aplicaciones industriales; las más importantes podrían ser las siguientes:

Industria Química: La existencia de salares en el Altiplano Chileno, en los cuales se encuentran además áreas de fuentes termales, y que contienen concentraciones relativamente altas de metales alcalinos (Li, Cs, K), boro y otros elementos trazas podrían emplear agua termal en sus procesos de extracción y separación.

Refinación de Azufre: Varias áreas termales presentan en sus cercanías volcanes con depósitos de azufre el que podría ser refinado en el lugar, contando el transporte de material estéril.

Producción de agua potable: El agua potable en el Norte de Chile es ocasionalmente escasa, y gran parte de ella es transportada mediante tuberías desde la alta cordillera. Los fluidos geotermales tienen el calor suficiente para su desalinización, esto se ha comprobado en El Tatio con una planta desalinizadora piloto que funcionó de 1975 a 1976 y permitió demostrar que se podría obtener agua pura en una proporción de 10 l/seg por cada MW eléctrico que se instalase.

Industria del papel: En la zona sur se podría emplear agua caliente o vapor en los procesos de elaboración de la celulosa.

REFERENCIAS

- Freeston, D.H., 1995.** Direct uses of Geothermal Energy 1995. Proc. Geoth. Congress Florence, Italy 18-31 May 1995, 1: 15-26.
- Huttrer, G. W., 1995.** The status of world Geothermal Power production 1990-1994. Proc. Geoth. Congress, Florence, Italy 18-31 may 1995 1: 3-13.
- Lahsen, A., and Trujillo, P. (1975).** El Tatio Geothermal Field. Chile. 2nd U.N. Symp. Develop. Use Geothermal Resources, San Francisco, 1975, 1, : 157-178.
- Lahsen, A., (1976).** Geothermal Exploration in Northern Chile. A summary. Min. Res. Conf. Honolulu, Hawaii, A.A.P.G. Memoir 25: 169-175.
- Lahsen, A., (1985).** Origen y potencial de energía geotérmica en los Andes de Chile. Geología y Recursos Minerales de Chile (Edit. Univ. de Concepción - Chile), 1, : 423-438.
- Lahsen, A., (1988).** Chilean Geothermal Resources and their possible utilization. Geothermics, Vol. 17, N° 2/3: 401-410.
- Lindal, B. 1973.** Industrial and other applications of geothermal energy geothermal energy (Ed. H.C. Armstead) Earth Sc. V. 12 UNESCO, París: 135-148.
- Uyeda, S., 1988.** Geodynamics, in Handbook of terrestrial heat-flow density determinations, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht. p. 486.