

Los isótopos en la exploración de energías geotérmicas

por E. Barbier, M. Fanelli y R. Gonfiantini*

A más de un lector de este Boletín, que suele dedicarse a los problemas de la energía nuclear, la publicación de este artículo sobre energía geotérmica pudiera parecerle bastante chocante. Cabe preguntarse, en efecto, qué pueden aportar las técnicas isotópicas a la captación y explotación de esta forma de energía, que tan solo representa una fracción pequeñísima de la energía producida actualmente en el mundo. En el presente artículo se procurará dar una somera idea de los orígenes de la energía geotérmica y de la función que cumplen, en la exploración geotérmica, las investigaciones isotópicas, que son solo una de entre las múltiples y variadísimas aplicaciones que tienen los isótopos en las esferas de la hidrología, la geoquímica y la geología.

El futuro de la energía geotérmica plantea interrogantes de nada fácil respuesta. Si bien es cierto que hasta el momento solo se han explotado los campos geotérmicos más accesibles, y que esta energía puede ser pronto importante para el pequeño industrial y social de muchas regiones de países en desarrollo, lo que confiere especial atractivo a la energía geotérmica es que tiene su origen último en una fuente prácticamente infinita: el calor del interior de la Tierra. En tal caso ¿cómo lograr explotar aunque solo sea la periferia de este inmenso almacén, rebosante de energía?

Las profundidades de la tierra, fuente de calor

Gracias a las mediciones efectuadas en el interior de las minas se sabe, ya desde el siglo XVIII, que la temperatura aumenta con la profundidad; en otras palabras, que existe un flujo constante de calor desde el interior de la tierra hasta su superficie. En promedio, el gradiente de temperatura correspondiente es de 3°C por cada 100 metros de profundidad.

A grandes rasgos, nuestro planeta se compone de tres capas concéntricas, que se denominan, comenzando por la más externa: corteza, manto y núcleo metálico. La corteza, compuesta principalmente de granito en su parte superior y de basaltos debajo, tiene un espesor de unos 35 kms, bajo los continentes; en el substrato oceánico su espesor es solo de 5 kms y está constituida principalmente por rocas basálticas. La corteza flota sobre los materiales más densos y plásticos, del tipo de

la peridotita, que constituyen el manto, cuyo espesor es de 2900 kms. La corteza está fragmentada en seis placas principales que, debido a sus movimientos, cambian de posición unas con respecto de otras.

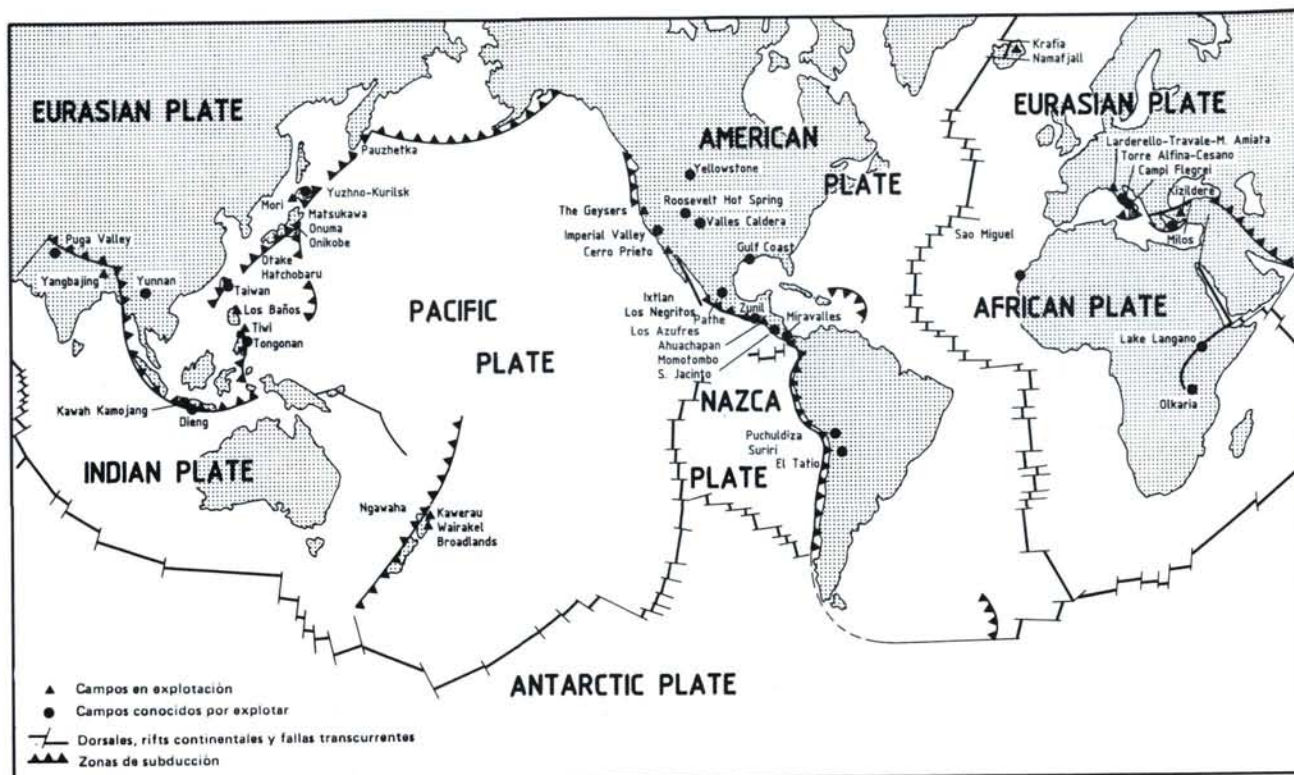
A lo largo de las llamadas dorsales oceánicas, los materiales del manto ascienden a la superficie de la Tierra, lo que hace que crezcan las placas adyacentes. Por lo tanto, las placas se alejan unas de otras a velocidades de entre 2 y 20 cm al año que en geología, son velocidades vertiginosas. Para compensar ese crecimiento, en otras zonas, llamadas "zonas de subducción", ocurre que una placa se mete debajo de la placa adyacente, penetrando en el manto. Estas zonas corresponden con frecuencia a fosas oceánicas bordeadas por guirnalda insulares o cadenas montañosas situadas en los bordes continentales. Las dorsales oceánicas y las zonas de subducción suelen ser los lugares por donde asciende a la superficie el calor interno de la Tierra y en los que están ubicados la mayor parte de los volcanes y de los campos geotérmicos.

Los campos geotérmicos

Los campos geotérmicos son zonas en las que la temperatura de las aguas subterráneas alcanza valores bastante superiores a los normales, y en los que estas aguas pueden utilizarse con diversos fines, como la calefacción de locales y la producción de energía eléctrica (si la temperatura pasa de los 150°C). El calor parte de intrusiones magmáticas situadas a profundidades de entre 7 y 15 km o bien —en los lugares en que la corteza terrestre tiene menor espesor— del manto mismo. El calor se transmite a las regiones subsuperficiales primero por conducción y luego por corrientes convectivas de aguas subterráneas. Las formaciones permeables que contienen el agua caliente (denominadas bolsas geotérmicas) están recubiertas de rocas impermeable, lo cual reduce parcial o totalmente las pérdidas de calor y mantiene la presión del fluido caliente. Practicando pozos que lleguen hasta la bolsa geotérmica se puede extraer y aprovechar el fluido caliente.

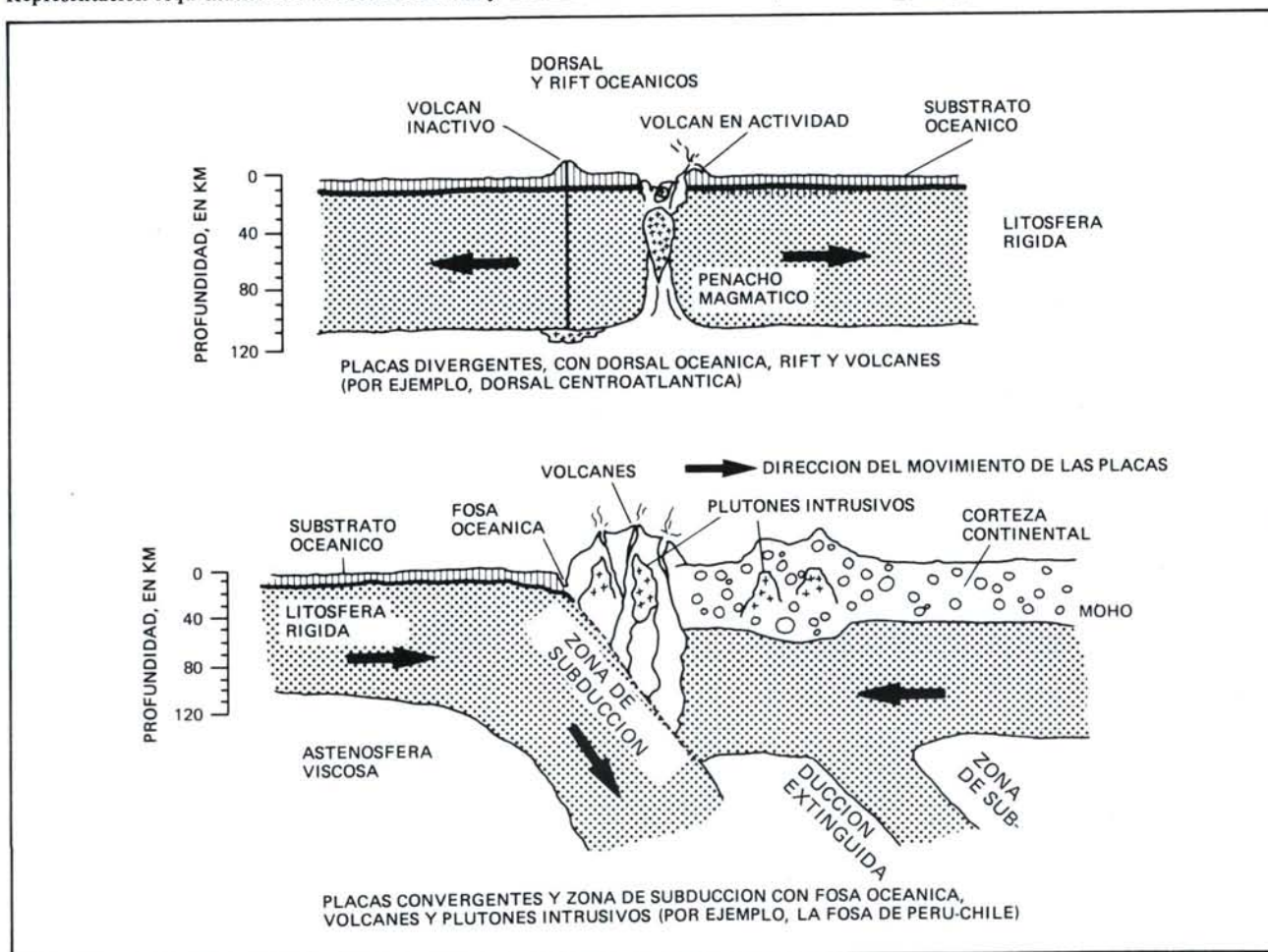
En condiciones especialmente favorables, puede producirse vapor seco supercalentado a temperaturas que a menudo superan los 250°C. El vapor puede transportarse directamente a unas turbinas que mueven alternadores para generar energía eléctrica. Este método de producción de energía eléctrica es el más barato de cuantos existen. Así ocurre, por ejemplo, en los campos de Larderello y Monte Amiata (Italia), The Geysers (California, Estados Unidos) y Matsukawa (Japón).

* Los Sres. Barbier y Fanelli pertenecen al Istituto Internazionale per le Ricerche Geotermiche, Via del Buongusto 1, 56100 Pisa (Italia). El Sr. Gonfiantini trabaja en la Sección de Hidrología Isotópica de la División de Investigaciones y Laboratorios del Organismo.



Ubicación geográfica de la mayor parte de campos geotérmicos conocidos. Están situados a lo largo de las dorsales oceánicas y de los rifts continentales y especialmente a lo largo de las zonas de subducción.

Representación esquemática de una dorsal oceánica y de una zona de subducción. (Geoth. Energy Mag., febrero de 1976).



Aunque en términos no tan ventajosos, también resultan rentables para la producción eléctrica los campos geotérmicos que aportan simultáneamente vapor y agua caliente. En estos casos, el agua ha de separarse del vapor antes de enviar éste a las turbinas. Pertenecen a este tipo los campos de Wairakei (Nueva Zelandia), Cerro Prieto (México), y otros del Japón, de Filipinas y de otros lugares. El agua caliente suele contener cantidades importantes de sales disueltas, lo cual puede ocasionar problemas de corrosión y de formación de incrustaciones.

Cuando la temperatura del agua subterránea es de tan solo 50–100°C, el agua se utiliza principalmente para la calefacción de locales (bloques de vivienda, invernaderos, etc.), como ya se hace en Francia, Hungría, Islandia, la República Popular de China, la URSS y muchos otros países. Además de esto, se usa también con fines medicinales y en balnearios.

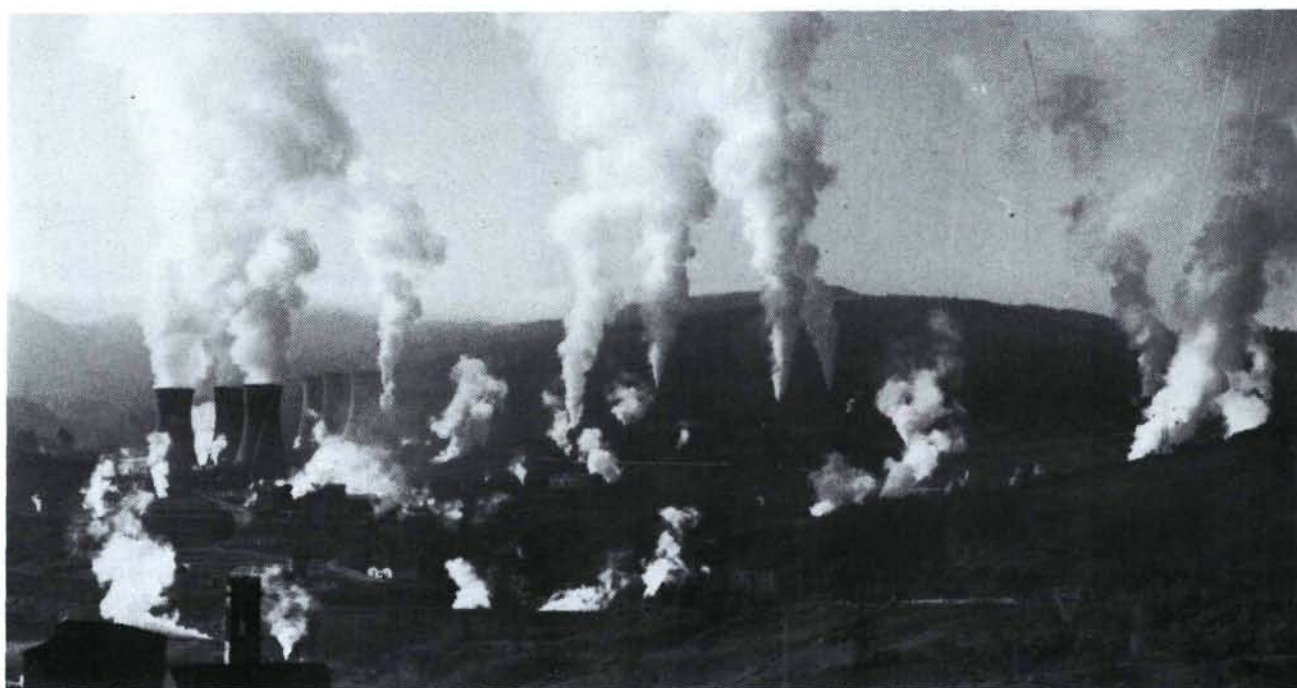
La potencia instalada de las plantas geotérmicas que funcionan actualmente en el mundo es solo de 2700 MW(e) (véase el Cuadro adjunto), lo que equivale aproximadamente al 2% de la capacidad nucleoelectrónica mundial. Por otra parte, a esta capacidad energética habría que sumarle la correspondiente a las aplicaciones de la energía geotérmica con fines distintos de la generación de energía eléctrica. Por añadidura, se ha localizado cierto número de campos geotérmicos que empezarán a explotarse durante de década de 1980, y que se encuentran en los países siguientes: Chile, Grecia, Guatemala, India, Nicaragua y las Indias Occidentales (Francia). En muchos otros países se están realizando trabajos de exploración de recursos geotérmicos con resultados prometedores, especialmente en Argentina, Bolivia, Bulgaria, Colombia,

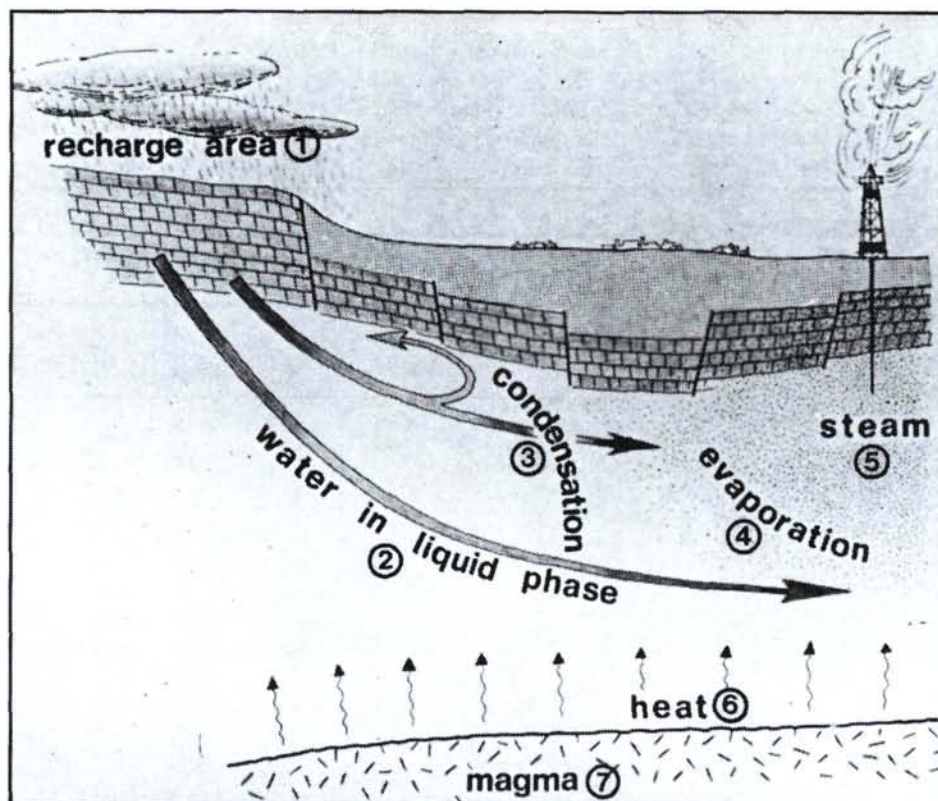
Costa Rica, Ecuador, España (Islas Canarias), Etiopía, Irán, Israel, Perú, Polonia, Tailandia y Yibuti. En muchos países en desarrollo, la producción eléctrica de origen geotérmico puede llegar a satisfacer una parte apreciable de la demanda energética.

Distribución mundial de la producción de energía eléctrica de origen geotérmico

País	Potencia instalada en 1982 MW(e)
El Salvador	95
EE.UU.	936
Filipinas	570
Indonesia	30
Islandia	41
Italia	440
Japón	174,5
Kenya	30
México	180
Nueva Zelandia	202
Portugal (Azores)	3
República Popular de China	4
Turquía	0,5
URSS	11
Total	2717

Vista del campo geotérmico de Larderello, en Toscana (Italia), visto desde Montecerboli. Destacan en el paisaje las torres de enfriamiento de las centrales geotérmicas y los penachos del vapor que despiden los pozos. El nombre de esta población proviene del latín *Mons Cerberi* o "montaña de Cerbero", el can tricéfalo que guardaba las puertas del Averno. Desde luego, los primeros habitantes del lugar debían de pensar que el infierno no estaría muy lejos. La mayor parte de las fuentes sulfurosas y de las fumarolas desaparecieron cuando comenzó la explotación intensiva de los campos geotérmicos.

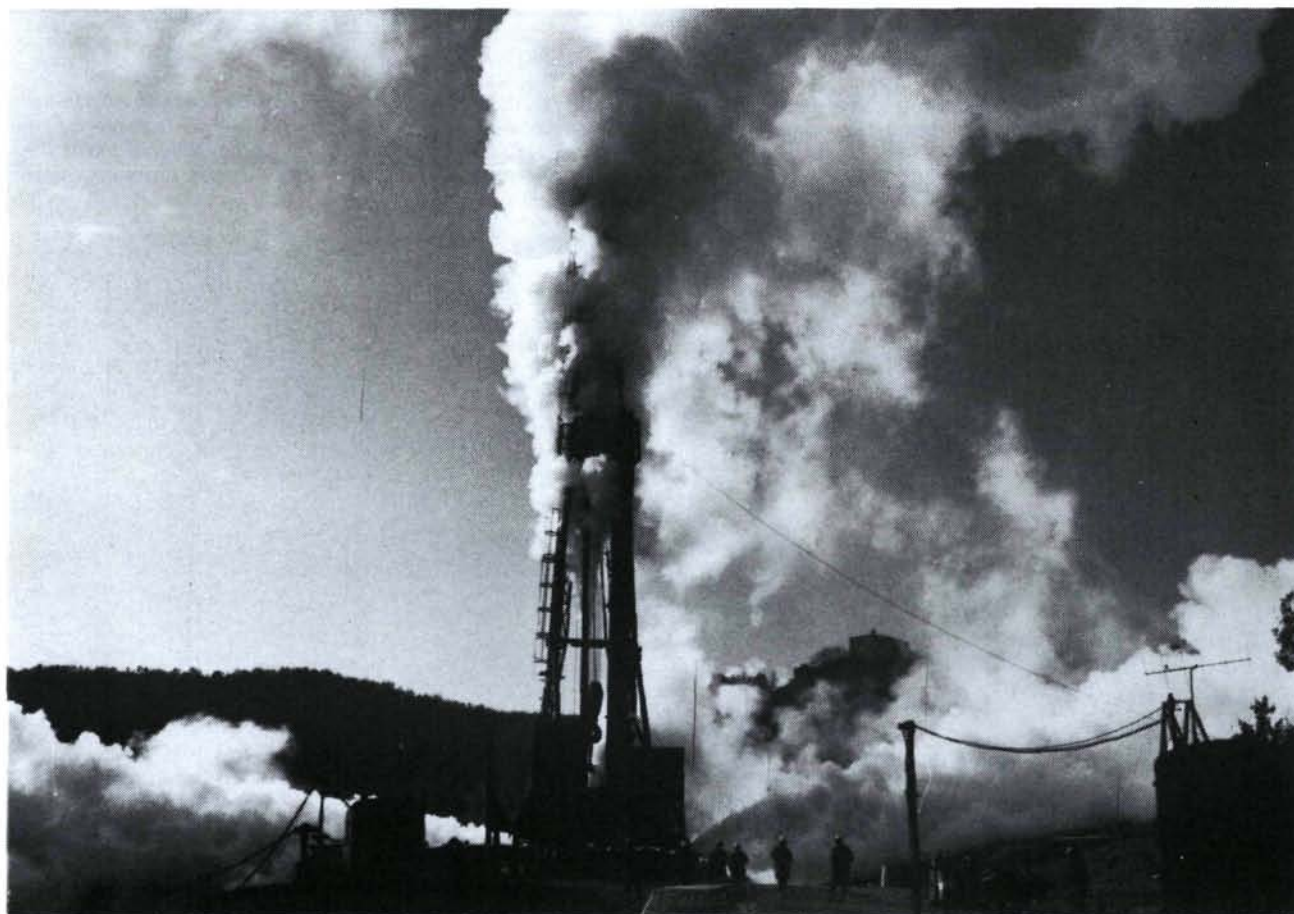




- ① zona de recarga
- ② agua en fase líquida
- ③ condensación
- ④ evaporación
- ⑤ vapor
- ⑥ calor
- ⑦ magma

Representación esquemática de un campo geotérmico.

Uno de los pozos de vapor de Larderello (Italia) en el momento en que, habiendo llegado la perforación hasta la bolsa geotérmica, el vapor irrumpe en la atmósfera. Este pozo, perforado en enero de 1972, producía por hora 326 toneladas de vapor a 184°C y a 8 atmósferas. Con el tiempo, la intensidad de la descarga va disminuyendo.



Según se espera, el calor encerrado en el interior de la Tierra se extraerá de formaciones cada vez más profundas, llegando incluso a rocas calientes muy hondas, que son compactas y secas. En estos casos, se practicarían dos pozos, que se comunicarían hidráulicamente entre sí, en el fondo mediante una fracturación reticular producida artificialmente. Así, se inyectaría agua fría en uno de los pozos y se obtendría agua a alta temperatura en el otro. Los primeros experimentos realizados a 3000 m de profundidad en Los Alamos (Nuevo México, EE.UU.), han demostrado la viabilidad de estos proyectos. La experimentación con miras a desarrollar y perfeccionar esta tecnología prosigue en los Estados Unidos y ha comenzado ya en el Reino Unido (Cornualles).

Los isótopos naturales como medios auxiliares en la exploración geotérmica

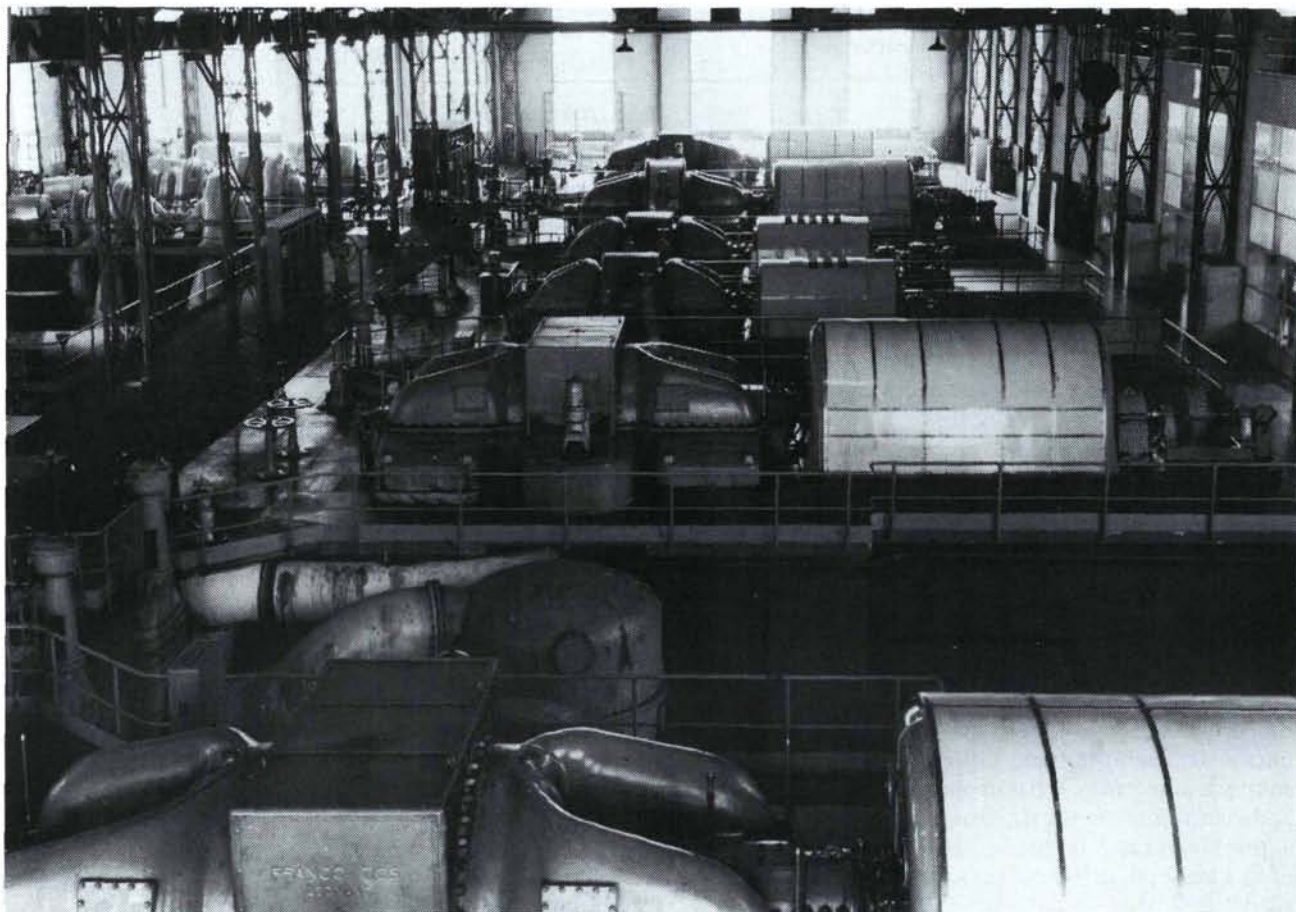
De todos los componentes del geotérmico, el agua es el más abundante y, al mismo tiempo, el principal portador de energía, en razón de su gran capacidad calorífica y de su elevado calor de vaporización latente. Junto al vapor de agua, el fluido geotérmico contiene otros componentes gaseosos, como dióxido de carbono (0,5%

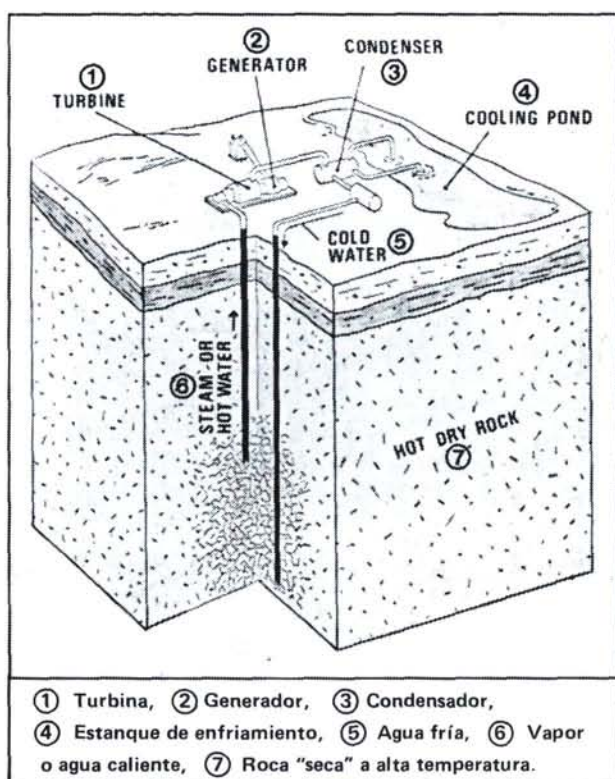
a 5%); sulfuro de hidrógeno, amoníaco, nitrógeno, metano, hidrógeno (en total, hasta un 2% o 3%); ácido bórico; y gases raros.

La primera aportación de las técnicas isotópicas al estudio de los campos geotérmicos consistió en demostrar que el vapor y el agua a alta temperatura provienen de la infiltración de aguas de lluvia a través de los afloramientos de las formaciones geológicas que constituyen la bolsa geotérmica. Aunque esta hipótesis nos parece hoy en día trivial, hace treinta años distaba mucho de recibir una aceptación general, hasta que las mediciones del contenido de deuterio y de oxígeno 18 la confirmaron definitivamente. Hasta entonces, los científicos creían que el vapor geotérmico era juvenil, que se había originado directamente en las profundidades de la tierra y que hacía acto de presencia en su superficie por vez primera.

Las mediciones isotópicas, sobre todo si se realizan paralelamente a otros análisis geoquímicos de tipo ordinario, proporcionan información sobre las características de los campos geotérmicos: por ejemplo, sobre la coexistencia de aguas de distintas temperaturas y orígenes; sobre los recorridos de las corrientes subterrá-

Interior de una central geotérmica en Larderello (Italia). Larderello, situado a 65 km al suroeste de Florencia, fue el primer campo geotérmico del mundo que se puso en explotación. En 1827, Francesco de Larderel, un ex-oficial del ejército de Napoleón que emigró a Toscana (había nacido en Vienne, en el Delfinado) tuvo la idea de explotar las aguas geotermales, evaporar una parte y extraer el ácido bórico. En su honor, el lugar recibió posteriormente el nombre de Larderello. En 1904, por primera vez en la historia, un pequeño turbogenerador produjo energía eléctrica a partir de vapor geotérmico, y un año después se instaló una central eléctrica de 20 kW. La producción de energía eléctrica en el mayor yacimiento geotérmico conocido, el de The Geysers, en California (Estados Unidos), no comenzó hasta 1960, aunque los primeros pozos de sondeo se practicaron en 1921 (Foto ENEL, Italia).





Esquema de un campo geotérmico artificial. Los dos pozos están interconectados hidráulicamente en el fondo mediante una red de fracturas artificiales provocadas en la roca caliente, que originariamente era compacta y seca. A través de uno de los pozos se inyecta agua fría, que se recoge por el otro en forma de vapor. En Los Alamos (Nuevo México, Estados Unidos) se ha realizado ya un experimento preliminar, con resultados satisfactorios. La profundidad era de 3000 m y las fracturas se produjeron inyectando agua a presión. Se está llevando a cabo un experimento análogo a 4000 m.

neas de fluidos a alta temperatura; sobre el grado de interacción con las rocas almacén; sobre el origen de los diversos componentes del fluido; etc. Pero la aplicación más importante de las técnicas isotópicas en la exploración geotérmica se encuentra probablemente en el cálculo de las temperaturas internas. Por lo común, este parámetro no es nada fácil de obtener, aunque resulta esencial para evaluar el potencial de los campos geotérmicos. En particular, los isótopos constituyen una ayuda inestimable en el curso de la exploración geotérmica preliminar de campos geotérmicos. Cuando aún no han comenzado las perforaciones, se toman muestras en los manantiales, en los géiseres y en las mofetas. Los isótopos cumplen también una función importante cuando la profundidad o el número de los pozos de sondeo son insuficientes.

Los geotermómetros isotópicos se basan en la propiedad de que la distribución isotópica de dos componentes en equilibrio termodinámico es solamente función de la temperatura. Los geotermómetros isotópicos más empleados se basan en tres tipos de isótopos: los de hidrógeno, en los sistemas gaseosos metano/hidrógeno y agua/hidrógeno; los de oxígeno, en el sistema agua/sulfatos disueltos; y los de carbono, en el sistema dióxido de carbono/metano.

Se han desarrollado también termómetros geoquímicos, cuyo funcionamiento se basa en el contenido de sílice de las aguas a alta temperatura: en las concentraciones relativas de sodio, potasio y calcio; o en la composición de la fase gas-vapor. Todos estos tipos de geotermómetros incluso los isotópicos, resultan afectados en grado diverso por los procesos que se operan durante la ascensión a la superficie de los fluidos geotérmicos: por ejemplo, los procesos de mezclado, las pérdidas por evaporación, la interacción con los minerales que encuentran durante su recorrido, la reequilibración parcial a temperatura más baja, etc. Pero, aun así, utilizando paralelamente el mayor número posible de geotermómetros se evalúan mejor los términos de corrección y se obtienen más fácilmente los resultados correctos.

Para determinar la presencia de aguas de origen reciente en fluidos geotérmicos se ha utilizado el tritio. Como es sabido, los ensayos termoneutroclícos atmosféricos han inyectado grandes cantidades de tritio en el ciclo hidrológico, especialmente durante los años 1952 a 1962. Por esta razón, el tritio sirve para evaluar el grado de mezcla de las aguas subterráneas poco profundas y para detectar la llegada y reconstruir el itinerario de los flujos de recarga de fluidos modernos a través de los bordes de los campos geotérmicos.

En tiempos recientes se ha hecho uso de isótopos para seguir el transcurso de fluidos reinyectados. Es ésta una nueva e interesante aplicación, consecuencia directa de los esfuerzos por atenuar la incidencia ambiental de los fluidos geotérmicos: en lugar de descargarlos en aguas de superficie después de su aprovechamiento, son reinyectados en el yacimiento y "reciclados". Con ello se puede conseguir también, entre otras cosas, que aumente la producción del campo.

Actividades del OIEA

Las actividades del Organismo por lo que respecta a la aplicación de técnicas isotópicas en la exploración geotérmica están a cargo de la Sección de Hidrología Isotópica de la División de Investigaciones y Laboratorios. La citada Sección coopera en la actualidad en proyectos de exploración geotérmica que se están llevando a cabo en Costa Rica, India, México y Tailandia. Hay otros proyectos que posiblemente se incluyan en un programa coordinado de investigaciones sobre aplicación de técnicas isotópicas a la hidrología y la geotermia en América Latina, financiado por el Gobierno de la República Federal de Alemania y ejecutado por el Organismo. Este programa se encuentra actualmente en su fase preparatoria, y el trabajo de campo comenzará probablemente a finales del presente año.

Recientemente (noviembre de 1981), el Organismo convocó una reunión de consultores sobre aplicación de técnicas isotópicas a la geotermia, cuyas actas se publicarán en un número especial de la revista *Geothermics*.

Hay que mencionar, por último, la permanente cooperación entre el Organismo y el Instituto Internazionale per le Ricerche Geotermiche, de Pisa (Italia), y con el Departamento de Investigaciones Científicas e Industriales de Petone y Lower Hutt (Nueva Zelanda).