



ENERGÍA GEOTÉRMICA

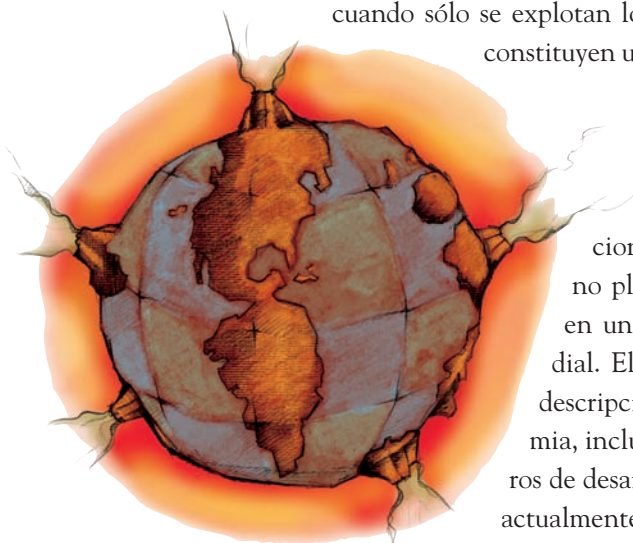
Édgar Santoyo y Rosa María Barragán-Reyes

Geotermia, se refiere a la energía que se encuentra en el interior de la Tierra. En México existe un potencial muy alto de recursos geotérmicos y experiencia en su explotación. Sin embargo, es prioritario seguir con investigaciones y desarrollo de tecnologías para la ubicación y explotación, sobre todo, de los sistemas de roca seca disponibles en el país.

La energía de la Tierra, mejor conocida como *energía geotérmica* o *geotermia*, es una energía renovable, prácticamente inagotable, con una madurez tecnológica sólida, limpia, versátil y útil para generar electricidad, entre otras múltiples aplicaciones.

Debido a que sus emisiones se componen prácticamente de vapor de agua, su uso no presenta riesgo ambiental para nuestro planeta. Hoy en día, la geotermia representa el 0.4 por ciento del total de la generación eléctrica mundial, aun cuando sólo se explotan los sistemas hidrotermales de alta temperatura, que constituyen una fracción muy pequeña de la inmensa cantidad de energía disponible en la Tierra.

Sin embargo, estudios científicos recientes relacionados con el desarrollo de técnicas mejoradas de exploración y explotación para nuevas generaciones de sistemas geotérmicos muestran que, a medio plazo, la generación geotermoeléctrica se convertirá en una pieza clave dentro del abanico energético mundial. El propósito de este artículo es presentar una breve descripción de las principales características de la geotermia, incluyendo sus beneficios, sus escenarios actuales y futuros de desarrollo, así como las tendencias de investigación que actualmente se realizan para su desarrollo sustentable.



A mediano plazo, la generación geotermoeléctrica se convertirá en una pieza clave dentro del abanico energético mundial



El flujo de calor desde el interior de la Tierra hacia los estratos superiores de la corteza produce cambios de temperatura a distintas profundidades, conocidos como *gradientes geotérmicos*

Geotermia

La palabra “geotermia” proviene de los vocablos griegos *geo*, Tierra; y *termos*, calor. Se define como la energía o calor natural que proviene del interior de la Tierra.

Este calor proviene básicamente del colapso gravitatorio que formó a la Tierra y de la desintegración radioactiva de elementos radiactivos como los isótopos de uranio, torio y potasio en la corteza terrestre. El contenido total de calor de la Tierra es inmensamente grande, del orden de 12.6 billones de exajoules (un exajoule equivale a un trillón de joules, unidades en que se mide la energía); se calcula que la corteza terrestre contiene unos cinco mil 400 millones de exajoules (Gupta y colaboradores, 2007).

El flujo de calor desde el interior de la Tierra hacia los estratos superiores de la corteza produce cambios de temperatura a distintas profundidades, conocidos como *gradientes geotérmicos* (Torres y colaboradores, 1993). Éstos pueden variar desde valores normales (alrededor de 30 grados centígrados por kilómetro) hasta unos 200 grados centígrados por kilómetro, en los bordes

de las placas tectónicas, donde el deslizamiento de éstas favorece el ascenso del magma. Este enorme flujo de calor suele calentar grandes extensiones de roca en la profundidad, donde se forman depósitos de fluidos calientes (denominados *yacimientos hidrotermales*) o sistemas de roca seca caliente (Gallup, 2009).

Con la tecnología actual, sólo los yacimientos hidrotermales pueden explotarse comercialmente para generar electricidad o para aprovechar el calor directamente en otras aplicaciones. La inmensa cantidad de energía térmica producida continuamente en estos sistemas y los largos tiempos geológicos requeridos para su agotamiento hacen que la geotermia sea considerada como una fuente alterna de energía, renovable y prácticamente inagotable.

Clasificación

Los sistemas geotérmicos existentes en la Tierra se clasifican, en forma general, con base en la temperatura del fluido endógeno que se extrae, o del fluido que se inyecta para la extracción de calor de la roca. Cuando la temperatura del fluido es mayor de 200 grados centígrados, se le considera un recurso de *alta entalpía* (o alto contenido energético), ideal para la producción de electricidad con sistemas convencionales de generación. Si las temperaturas del fluido están en el intervalo de 100 a 200 grados centígrados, o bien son menores de 100 grados centígrados, se les denomina sistema de *mediana o baja entalpía*, respectivamente.

Entre los sistemas geotérmicos más conocidos se tienen a los siguientes:

a) *Sistemas hidrotermales convectivos*: Están constituidos por una fuente de calor, fluidos que constituyen el medio de transporte del calor, roca permeable donde se almacenan los fluidos y una capa de “roca sello”. Los fluidos se infiltran en la corteza terrestre a través de poros y fracturas hasta alcanzar un yacimiento, donde se almacenan por largo tiempo. La existencia de estos yacimientos se manifiesta en la superficie por la presencia de manantiales calientes, fumarolas, géisers, lagunas de lodo hirviente o suelos calientes. Estos yacimientos pueden ser de vapor o líquido dominante de alta temperatura, o de líquido de mediana o baja temperatura (Figuras 1 y 2).

Para la generación de electricidad, se extraen fluidos bifásicos (líquido y vapor) de alta temperatura (más de 200 grados centígrados) mediante pozos perforados, y se transportan a la superficie para una separación eficiente. El vapor separado se conduce hacia turbinas de generación (Figura 3; Flasheo de vapor), mientras que el agua separada, dependiendo de su temperatura, es

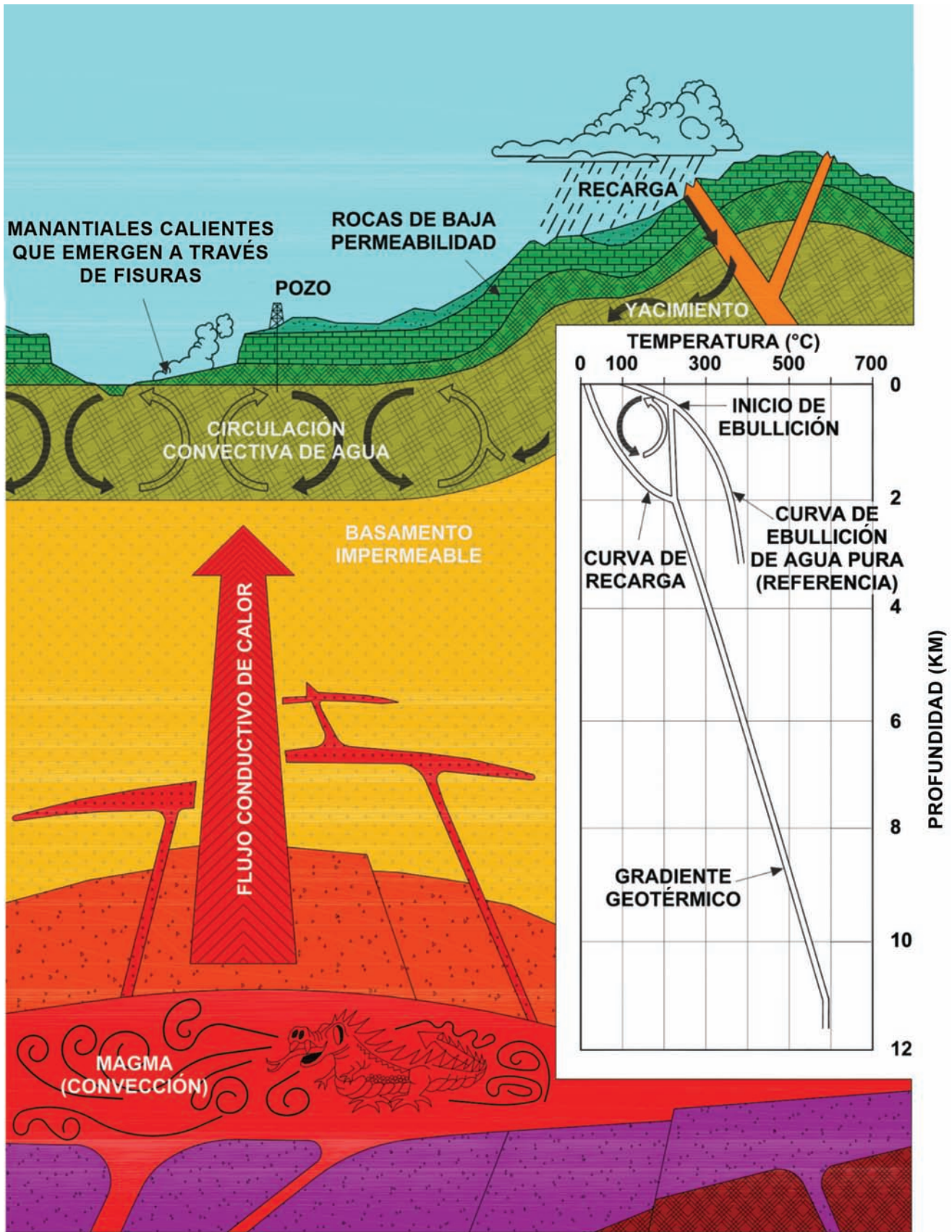


Figura 1.

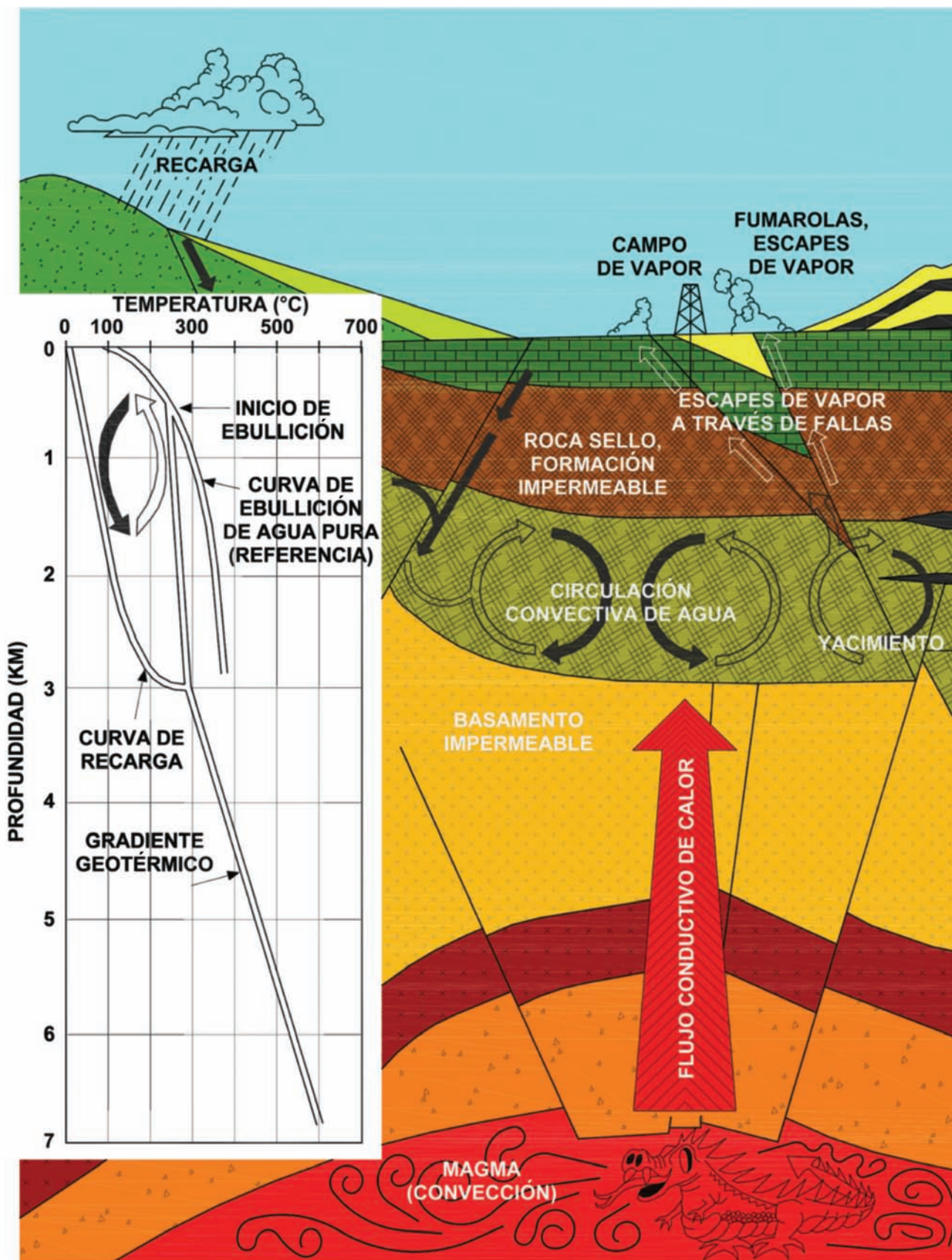


Figura 2.

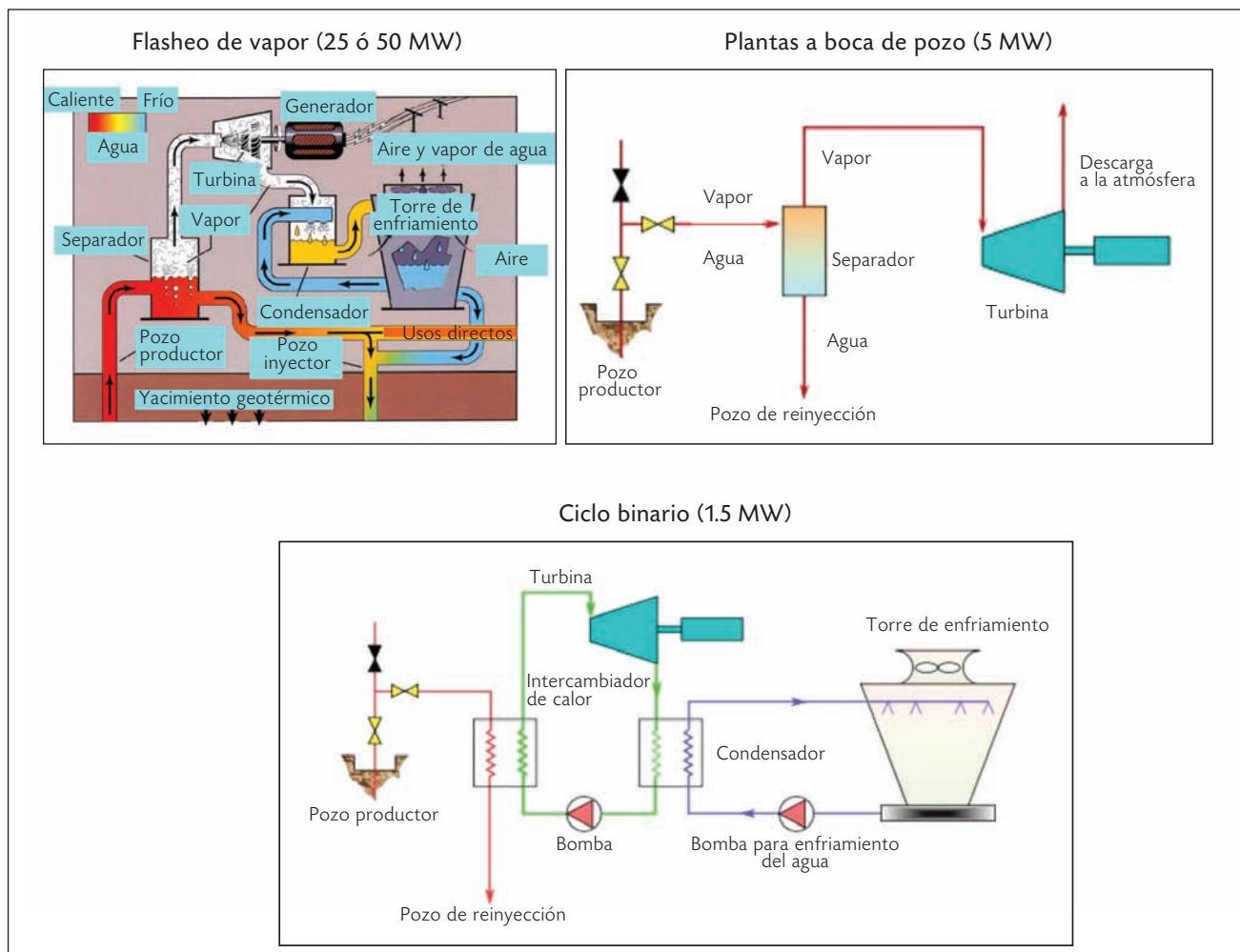


Figura 3. Plantas geotermoeléctricas convencionales.

reutilizada en diversas aplicaciones antes de regresarla al subsuelo para recargar el sistema y evitar problemas de contaminación del medio ambiente. Por otro lado, los fluidos de mediana temperatura (menos de 200 grados centígrados) son usados en plantas de ciclo binario, donde ceden su energía a un fluido secundario de bajo punto de ebullición para evaporarlo y utilizarlo como vapor para producir electricidad (figura 3; Ciclo binario).

b) *Sistemas geotérmicos de roca seca caliente o “sistemas geotérmicos mejorados”*: Consisten en roca seca a muy alta temperatura (alrededor de 650 grados centígrados) localizada entre 2 y 4 kilómetros de profundidad, y con la característica particular de no contar con fluidos suficientes en el fondo para transportar el calor hacia la superficie. Su explotación requiere de la creación de una red de fracturas en la roca y la inyección de fluidos para su aprovechamiento. Por su inmenso potencial y su distribución

prácticamente uniforme en toda la superficie terrestre, se estima que para el 2050 podrían obtenerse alrededor de cien mil megawatts (millones de watts, unidad en que se mide la potencia; Massachusetts Institute of Technology, 2006). Esta promisorio tecnología se encuentra ya en fase de investigación y desarrollo con avances muy importantes; destaca el proyecto demostrativo de Soultz-sous-Forêts, en Francia, con una planta piloto de 1.5 megawatts.

c) *Sistemas geotérmicos geopresurizados*: Contienen agua y metano disuelto a alta presión (unos 700 bar, unidad de presión) y mediana temperatura (entre 90 y 200 grados centígrados). Actualmente estos recursos no se explotan y se desconoce su existencia en México.

d) *Sistemas geotérmicos marinos*: Se localizan en el fondo del mar, y se manifiestan como descargas, fumarolas o chimeneas hidrotermales. Se han identificado en el golfo de California, en México, con temperaturas hasta de 350 grados centígrados, y por el momento no se explotan comercialmente.

e) *Sistemas geotérmicos magmáticos*: Consisten de roca fundida (a unos 800 grados centígrados) y están asociados con aparatos volcánicos activos. Para extraer el calor de estos sistemas se han desarrollado algunos proyectos piloto en Hawaii e Islandia, pero su explotación comercial requiere la búsqueda de materiales adecuados que resistan la corrosión y las altas temperaturas.

f) *Sistemas geotérmicos supercríticos*: Se ubican a grandes profundidades (entre 5 y 6 kilómetros) y contienen fluidos en estado supercrítico (es decir: a presión y temperatura tal, que adopta un estado intermedio entre líquido y

gas) con temperaturas de hasta 600 grados centígrados; se han detectado cerca de Islandia, donde actualmente se investiga la factibilidad de su explotación (*Iceland Deep Drilling Project*, 2010). Este tipo de sistemas supercríticos pueden proveer hasta diez veces más energía que los sistemas geotérmicos convencionales, por lo que, de ser factible su explotación, la capacidad geotermoeléctrica podría incrementarse en varios órdenes de magnitud.

Escenarios de generación geotermoeléctrica y usos directos

Si bien la energía geotérmica es abundante y renovable, con la tecnología actual sólo una pequeña fracción de los recursos mundiales se explota para producir electricidad y otras aplicaciones directas de calentamiento. La generación geotermoeléctrica se inició en Italia (en Larderello, Toscana) en 1904, y en México (en la localidad de Pathé, Hidalgo) en 1959. Actualmente se explota en 24 países para producir electricidad (Bertani, 2007) y en más de 60 países en usos directos (Lund y colaboradores, 2005; Figura 4).

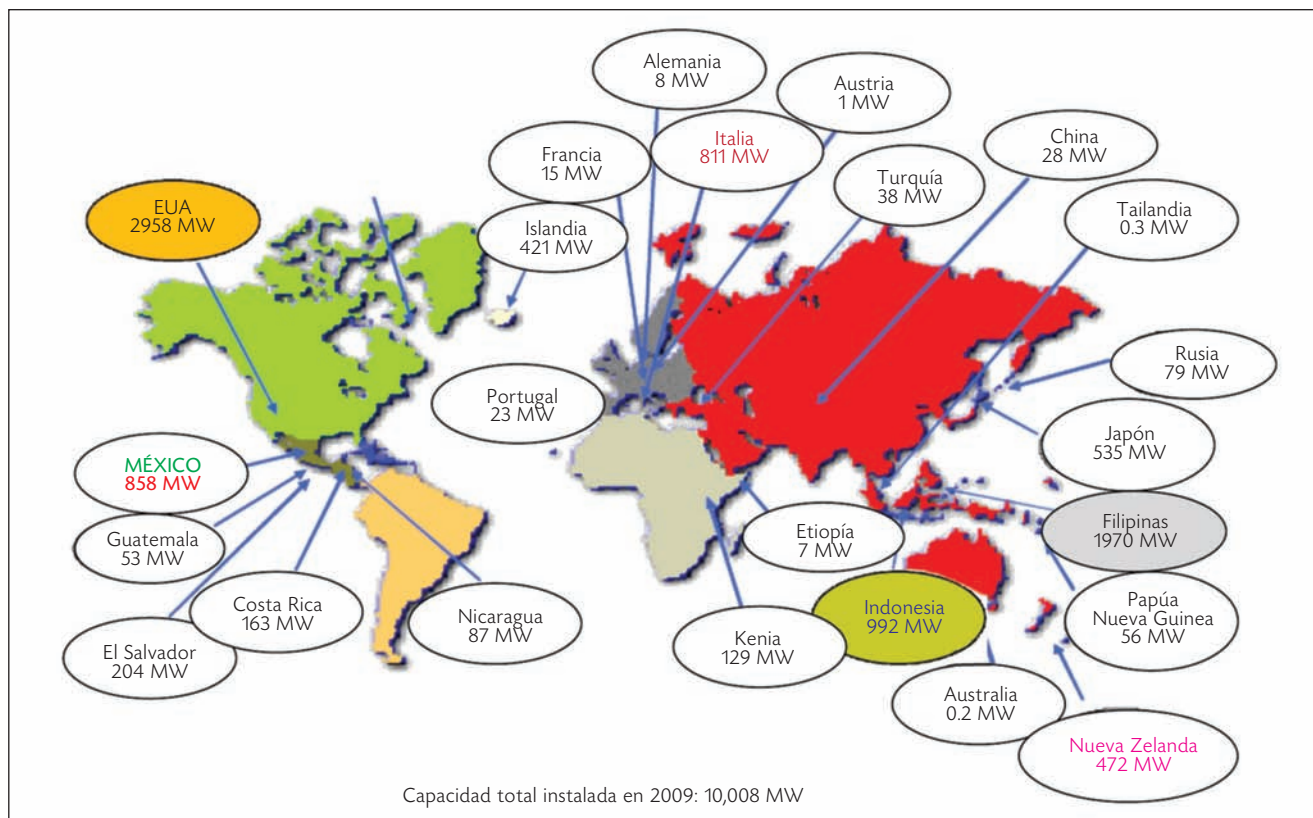


Figura 4. Capacidad total geotermoeléctrica instalada.

Generación geotermoeléctrica mundial

Actualmente, sólo los sistemas hidrotermales convectivos, con temperaturas entre 200 y 350 grados centígrados y profundidades de alrededor de 3 kilómetros, se explotan comercialmente para generar electricidad. En 2007, la capacidad mundial instalada de generación geotermoeléctrica alcanzó 9 mil 732 megawatts (aproximadamente un 0.4 por ciento de la generación eléctrica total). Estudios prospectivos indican que para el 2010 la capacidad instalada alcanzará 11 mil megawatts, y que en el 2050 se incrementará hasta 140 gigawatts (millones de watts), en la medida en que resulte técnica y económicamente factible la explotación de los sistemas de roca seca caliente (Gallup, 2009).

Generación geotermoeléctrica en México

México cuenta actualmente con una capacidad geotermoeléctrica instalada de 965 megawatts, a través de la explotación de cuatro campos geotérmicos: Cerro Prieto, Baja California (720 megawatts); Los Azufres, Michoacán (195 megawatts); Los Humeros, Puebla (40 megawatts); y Las Tres Vírgenes, Baja California (10 megawatts) (Gutiérrez-Negrín y colaboradores, 2005; véase Figura 5). Esta producción representa alrededor del 2.97 por ciento de generación por fuente (datos reportados por la Comisión Federal de Electricidad, 2010), lo cual significa en el contexto mundial que México ocupa el cuarto lugar en generación geotermoeléctrica, después de Estados Unidos (2 mil 687 megawatts), Filipinas (mil 970 megawatts) e Indonesia (992 megawatts). En el 2010 se planea incrementar la capacidad a mil 186 megawatts, con la construcción de nuevas plantas en Cerro Prieto (100 megawatts) y Los Humeros (46 megawatts), así como con el proyecto reestructurado del campo geotérmico Cerritos Colorados, Jalisco (75 megawatts). Adicionalmente podrían generarse otros 150 megawatts con plantas de ciclo binario que usen el agua separada de los campos en explotación. Los costos de generación geotermoeléctrica se consideran competitivos a nivel mundial (entre 2 y 10 centavos de dólar americano por kilowatt/hora), mientras que en México fluctúan entre 3.29 y 4.11 centavos de dólar americano por kilowatt/hora. Los costos de inversión de proyectos “llave en mano” varían entre 800 y 3 000 centavos de dólar americano por kilowatt/hora (Gallup, 2009).

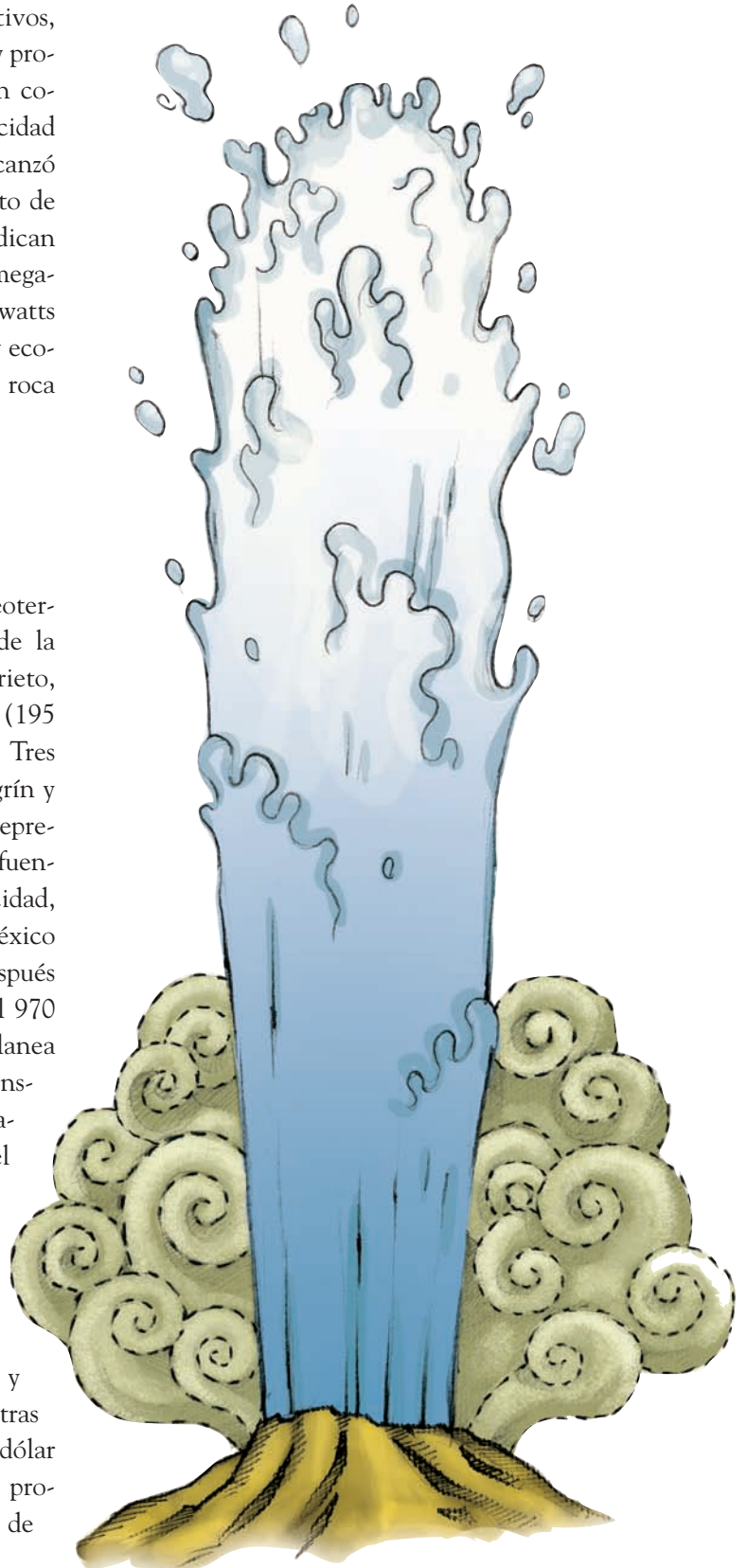




Figura 5. Recursos geotérmicos de México.

Usos directos de la energía geotérmica

Los recursos geotérmicos con temperaturas de más de 200 grados centígrados usualmente se aprovechan en aplicaciones directas. En 2005 se tuvo una producción total de aproximadamente 28 mil 268 megawatts a partir de fuentes geotérmicas en 72 países, de los cuales 52 por ciento fue usado en acondicionamiento térmico de espacios y viviendas, 30 por ciento en balneología (balnearios) y 18 por ciento en aplicaciones térmicas para procesos industriales y calentamiento de invernaderos y estanques. Entre estas aplicaciones destacan el acondicionamiento térmico de espacios (viviendas, edificios o distritos) a tra-

vés del uso de *bombas de calor geotérmicas*, las cuales aprovechan el gradiente de temperatura del suelo (a profundidades entre 2 y 100 metros), como fuente o sumidero de calor. En invierno el calor es extraído de la tierra y liberado en el espacio a acondicionar, mientras que en el verano el proceso se invierte. Las bombas de calor geotérmicas constituyen la aplicación líder de energías renovables a nivel mundial, por su alta eficiencia y economía, ya que reducen el consumo de energía en un 30 a 60 por ciento con respecto a los sistemas convencionales de acondicionamiento.

En México, a pesar de la abundancia de recursos geotérmicos de mediana y baja temperatura, sus usos directos se han limitado a la balneología y los tratamientos terapéuticos (Gutiérrez-Negrín y colaboradores, 2005). Se tiene una capacidad instalada de alrededor de 164.7 megawatts en unos 160 sitios, y una producción de aproximadamente 12 mil 500 toneladas por hora de agua

con temperaturas de 50 grados centígrados. Otros proyectos piloto han sido desarrollados por la Comisión Federal de Electricidad para la extracción de fertilizantes, calefacción de oficinas e invernaderos y el secado de madera. Además, se ha realizado investigación con bombas de calor operadas con energía geotérmica residual para refrigeración y purificación de efluentes.

Impacto ambiental de los proyectos geotermoeléctricos

Las principales emisiones de las plantas geotermoeléctricas consisten en vapor de agua, con un contenido mínimo de gases. Las pequeñas cantidades de dióxido de carbono (CO_2) que se liberan son comparables con las que se emitirían a la atmósfera por descargas naturales (fumarolas o géiseres), aun sin el desarrollo de proyectos geotérmicos comerciales. Dependiendo del tipo de fuente usada, la generación de electricidad produce emisiones de dióxido de carbono como gas (453 gramos por kilowatt/hora), hidrocarburos (906 gramos por kilowatt/hora) y carbón (mil 42 gramos por kilowatt/hora). En contraste, la geotermia produce entre 13 y 272 gramos de dióxido de carbono por kilowatt/hora. Considerando estos factores, la generación geotermoeléctrica mundial (alrededor de 9 mil 732 megawatts) ha evitado la liberación de 16 millones de toneladas de dióxido de carbono, 32 mil toneladas de óxidos de nitrógeno (NO_x), 78 mil toneladas de óxidos de azufre (SO_x) y 17 mil toneladas de partículas a la atmósfera, si se compara con una producción equivalente obtenida de plantas carbóelctricas. Debido a este tipo de argumentos, se ha reconocido que la explotación de la geotermia ayuda a reducir impactos

negativos al medio ambiente y a mitigar el calentamiento global de la Tierra (Kagel y Gallowell, 2005).

Madurez tecnológica y sustentabilidad de la energía geotérmica

La energía geotérmica es una de las energías renovables con mayor madurez tecnológica y sustentabilidad energética, lo cual es avalado por los largos tiempos de explotación que han exhibido los campos geotérmicos, sin afectar sus reservas energéticas, como Larderello, en Italia (alrededor de 100 años); Los Géiseres, en Estados Unidos (unos 78 años) y Cerro Prieto, en México (unos 35 años).

Principales obstáculos para el uso de la energía geotérmica

Los principales obstáculos que enfrenta la explotación de la energía geotérmica se atribuyen a problemas en: 1) las fases de exploración y desarrollo de nuevos proyectos geotérmicos, las cuales implican riesgos relativamente altos por incertidumbre y fuertes inversiones para lograr la localización correcta de sitios de interés y la perforación de pozos



direccionales para encontrar la zona de producción que asegure el proyecto comercial; y 2) en la fase de explotación, debido a problemas relacionados con la eficiencia de sistemas de generación/cogeneración, la corrosión e incrustación de pozos e instalaciones, y la disposición de fluidos residuales. Actualmente, investigadores y especialistas de todo el mundo trabajan intensamente para proponer nuevas metodologías y tecnologías mejoradas para solucionar estos problemas. Algunos avances sorprendentes ya han sido obtenidos; por ejemplo, en Alaska, en donde se ha logrado producir electricidad a partir de fluidos con temperaturas de 76 grados centígrados, usando plantas de ciclo binario más eficientes (Chamorro-Camazón, 2009).

Líneas futuras de investigación

Desde el punto de vista técnico y con el objeto de que “la explotación geotérmica sea más sustentable, confiable, competitiva y rentable” es crucial incrementar las tareas de investigación y desarrollo tecnológico en el corto y mediano plazos para: 1) mejorar los métodos de exploración y explotación de los sistemas geotérmicos convencionales, incluyendo el desarrollo de nuevas tecnologías para el aprovechamiento de los sistemas de roca seca caliente; 2) asimilar o desarrollar tecnologías para la perforación y construcción de pozos geotérmicos direccionales; 3) plantear estrategias para el aprovechamiento integral de los recursos geotérmicos, considerando la generación de electricidad con plantas convencionales y de ciclo binario, esquemas de co-generación y usos directos en procesos en cascada; y 4) optimizar las plantas de generación mediante la investigación de nuevos ciclos termodinámicos más eficientes, entre otras opciones.

Desde el punto de vista de política energética, y con el objetivo de “impulsar e incremen-



tar la capacidad de generación geotermoeléctrica y diversificar sus usos directos para garantizar su desarrollo sustentable”, se propone: 1) promover la aplicación de la energía geotérmica de baja y mediana temperatura para apoyar programas de ahorro y uso eficiente de energía en sitios donde se encuentre disponible; 2) lograr que el gobierno reconozca que la energía geotérmica es una alternativa más para satisfacer la futura demanda de energía; 3) ajustar el precio de la energía generada a partir de fuentes renovables con respecto al precio de tecnologías convencionales; 4) impulsar la investigación para mejorar la tecnología actual, especialmente en la perforación de pozos profundos direccionales y el diseño de nuevas plantas de generación/co-generación; 5) preparar recursos humanos altamente especializados para enfrentar los nuevos retos científicos y tecnológicos de los sistemas geotérmicos de nueva generación; y 6) educar a la población sobre los beneficios directos de la energía geotérmica, entre otras.

Conclusiones

La energía geotérmica es un recurso renovable, sustentable, limpio y seguro que permite la generación de electricidad de forma continua y confiable, que ahorra en el uso de combustibles fósiles y contribuye así a diversificar las fuentes de energía.

La generación geotermoeléctrica tiene un factor de capacidad (horas anuales de operación frente al total posible) mucho mayor que otras energías renovables (por ejemplo, la solar o la eólica, que presentan fuertes dependencias estacionales u horarias). Las plantas geotermoeléctricas pueden operar continuamente las 24 horas al día y los 365 días al año, excepto por paros necesarios de mantenimiento.

En México existe identificado un potencial muy alto de recursos geotérmicos y experiencia en su explotación. Sin embargo, es necesario continuar realizando tareas de investigación y desarrollo tecnológico para su óptimo aprovechamiento y, sobre todo, para identificar y explotar los sistemas promisorios de roca seca caliente que estén disponibles en el país.

Édgar Rolando Santoyo Gutiérrez es investigador titular del Centro de Investigación en Energía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), coordinador de geoenergía y líder de proyectos sobre estudios avanzados de geoquímica, geoquimiometría y simulación de procesos en sistemas geotérmicos. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, la Academia Mexicana de Ciencias, la Academia de Ingeniería y la Academia de Ciencias de Morelos; asimismo, es miembro fundador del Instituto Nacional de Geoquímica (INAGEQ).

esg@cie.unam.mx

Rosa María Barragán-Reyes es investigadora del Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Geotermia. Trabaja en el desarrollo de modelos conceptuales de yacimientos geotérmicos y su respuesta a la explotación. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, la Academia Mexicana de Ciencias, la Academia de Ingeniería, la Asociación Geotérmica Mexicana (de la que fue presidenta en el periodo 2002-2004) y del consejo directivo de la *International Geothermal Association* (2004-2010).

rmb@iie.org.mx

Lecturas recomendadas

- Bertani, R. (2007), "World geothermal generation in 2007", *Geo-Heat Center quarterly bulletin*, septiembre 2007, pp. 8-19.
- Chamorro-Camazón, C. (2009), "Energía eléctrica a partir de recursos geotérmicos. Estado actual y perspectivas a nivel mundial", *Dyna*, vol. 84 (1), pp. 44-51.
- Comisión Federal de Electricidad (2010). Disponible en: www.cfe.gob.mx
- Gallup, D. L. (2009), "Production engineering in geothermal technology: A review", *Geothermics*, vol. 38 (3), pp. 326-334.
- Gupta, H. K. y S. Roy (2007), *Geothermal energy: an alternative resource for the 21st century*, Ámsterdam, Elsevier Science, pp. 199-229.
- Gutiérrez-Negrín, L. C. A. y J. L. Quijano-León (2005), "Update of geothermics in Mexico", en *Proceedings of the World Geothermal Congress, Antalya, Turquía, 24-29 de abril*, 10 p.
- Iceland Deep Drilling Project (2010). Disponible en: www.iddp.is
- Kagel, A. y K. Gawell (2005), "Promoting geothermal energy: air emissions comparison and externality analysis", *The electricity journal*, vol. 18, núm. 7, pp. 90-99.
- Lund, J. W., D. H. Freeston y T. L. Boyd (2005), "Worldwide direct-uses of geothermal energy 2005", *Geothermics*, vol. 34 (6), 691-727.
- Massachusetts Institute of Technology (2006), "The future of geothermal energy: impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century, MIT, 372 p.n. Disponible en: (http://www1.eere.energy.gov/geothermal/future_geothermal.html).
- Torres, V., V. Arellano, R. M. Barragán, E. González, J. J. Herrera, E. Santoyo y S. Venegas (1993), *Geotermia en México*, México, Programa Universitario de Energía, Coordinación de la Investigación Científica, UNAM, 161 p.