

Los sistemas hidrotermales

y el origen de la vida

A finales de la década de los sesenta y principio de los setentas surge la idea de un programa de investigación de carácter interdisciplinario sobre los manantiales termales de México, cuando el primero de los autores de este artículo desarrollaba una serie de investigaciones acerca de los yacimientos minerales del centro y sur de México. En esa época se iniciaban los estudios formales de la Comisión Federal de Electricidad en el Eje Volcánico Transmexicano para la explotación de yacimientos geotér-

micos con miras a la generación de electricidad. En ellos se establecía una estrecha relación entre la alteración y mineralización de la roca y las zonas de hidrotermalismo activo.

No obstante que los manantiales submarinos se descubrieron en 1977 en la dorsal de las Galápagos, el hidrotermalismo cobra auge cuando aparece en el número de noviembre de 1979 de la revista *National Geographic* la descripción y las fotografías de la primera solfatara submarina de alta temperatura, con enormes gusa-

nos en forma de tubo y almejas, localizada en la dorsal Rivera a 2 500 metros de profundidad frente a la costa de Nayarit. Por su latitud, esta fumarola localizada con el submarino *Alvin* fue denominada "21°N"; su color era negro debido al alto contenido en sulfuros de hierro. A tal hallazgo seguiría el de las ventilas de la cuenca de Guaymas en 1982, hecho por el mismo submarino a 2 000 metros de profundidad, así como el de una serie de ventilas distribuidas a todo lo largo del sistema global de dorsales. A



Caldor

raíz de tales descubrimientos la importancia del hidrotermalismo ha ido en aumento, como lo manifiesta la creación de proyectos internacionales de índole interdisciplinaria —entre ellos el llamado *InterRidge*, creado en 1992 con sede en Tokio, con un extenso plan de actividades para el periodo 2004-2013, y el de la *Carnegie Institution of Washington*, enfocado tanto a sistemas terrestres como extraterrestres.

A nivel mundial, la investigación científica básica sobre los sistemas

hidrotermales se desarrolla en las siguientes líneas: 1) génesis de yacimientos minerales en sistemas hidrotermales continentales, tanto fósiles como activos; 2) nuevas técnicas y métodos para la obtención de energía en rocas secas sobrecalentadas mediante inyección de agua y la racionalización del uso de esos sistemas; 3) exploración de manantiales hidrotermales en dorsales y corteza oceánica; 4) origen de la biósfera; 5) información biogeológica contenida en los depósitos hidrotermales; 6) su viabi-

lidad como ambientes potenciales de síntesis prebióticas; y 7) homologación de la evolución biológica en otros cuerpos de nuestro sistema solar.

Hidrotermalismo y mineralización

Se conoce como hidrotermalismo al conjunto de efectos producidos por el agua a una temperatura mayor que la ambiental. A los lugares donde brota este agua se les conoce como manantiales termales. Entre los fenómenos naturales más espectaculares están

los manantiales calientes con temperaturas muy cercanas a la del punto de ebullición del agua. Sin embargo, un géiser es todavía más espectacular y consiste en una fuente emergente dotada de un sistema especial de calentamiento y desfogue que da lugar a una columna de agua y vapor que es expulsada con gran fuerza y frecuentemente alcanza entre 30 y 60 metros de altura. Antes y después de que el chorro cese sobreviene un estruendoso ruido provocado por la expulsión rápida y violenta de una columna de vapor, seguida por un periodo de calma al terminar la erupción. Este comportamiento confiere a la actividad del géiser un carácter intermitente y sincrónico.

Cuando un manantial tiene un gasto constante, no intermitente, de una mezcla de agua, vapor y gases, se le da el nombre de fumarola; cuando esta última precipita una cantidad abundante de azufre en la periferia y tiene un alto contenido de ácido sulfúrico se le da el nombre de solfatará; y se llama sofión (del italiano *sofione*, aplicado originalmente al agua con un alto contenido de ácido bórico)

cuando en la fumarola predomina el vapor. A pesar de contar con numerosas zonas geotérmicas y manantiales emergentes (ver recuadro "Sistemas hidrotermales en México"), México sólo posee un géiser, localizado en San Juan Cosalá, Jalisco, pegado a la margen occidental del lago de Chapala. Aunque en la ciudad de Puebla se halla el vestigio de un posible géiser fósil.

El agua de un manantial termal puede ser meteórica, o sea proveniente de la superficie del terreno (lluvia, ríos, lagos o del subsuelo) o magmática, que se libera junto con otros fluidos y volátiles de un magma ascendente por disminución de presión y temperatura. Al agua magmática también se le llama agua juvenil. Los sistemas hidrotermales se generan, en la gran mayoría de los casos, por fuentes magmáticas de calor. La variación en la temperatura y la densidad de los fluidos conducen a una circulación convectiva dentro de la corteza, la cual produce una transferencia de calor y minerales a gran escala. El hidrotermalismo se desarrolla en cualquier lugar de la corteza terrestre donde el

agua coexiste con una fuente de calor. Los sistemas hidrotermales constituyen vestigios importantes en la evolución y diferenciación temprana de la corteza terrestre al enlazar los procesos de la litósfera con los ciclos hidrológico y atmosférico. Los precipitados químicos de sus aguas consisten en conjuntos mineralógicos simples donde predominan el sílice, los carbonatos, los sulfuros metálicos, los óxidos y las arcillas. La mineralogía depende de la composición de la roca encajonante, la temperatura, la concentración de iones hidrógeno (pH) y el potencial de óxido reducción (eH) de los fluidos hidrotermales. A través del tiempo geológico, el desprendimiento de volátiles de los sistemas hidrotermales ha contribuido significativamente a la formación de los océanos y de la atmósfera.

Cuando el magma inicia su camino ascendente desde el manto superior y alcanza la corteza oceánica o la continental —ya sea en dorsales oceánicas, puntos calientes, sitios ubicados encima de sistemas de subducción o fracturas corticales—, disminuye la presión y el calor, y ocurre el llamado proceso de diferenciación magmática, que consiste en la cristalización de minerales en una serie progresiva conforme disminuye la temperatura. Así se forman diversos tipos de roca a partir del magma parental, separándose finalmente en la parte superior de las cámaras magmáticas las fracciones más ligeras, más alcalinas y más acuosas. Estas aguas magmáticas transportan, aunque en cantidades reducidas, los elementos de mayor movilidad, comunes en todos los magmas: cobre, plomo, zinc, plata, oro, litio, berilio, boro, rubidio, cesio, sodio, potasio y calcio. La capacidad de transporte de metales se in-

SISTEMAS HIDROTERMALES EN MÉXICO

Desde hace casi cuatro décadas los estudios de geotermia en México se han enfocado hacia la generación de electricidad. Los manantiales para usos turísticos y terapéuticos han adquirido un inusitado auge, como lo demuestran los numerosos balnearios termales localizados en diferentes partes del Eje Neovolcánico Transmexicano. El número de áreas geotérmicas de México es de más de 545. En más de 41 la Comisión Federal de Electricidad ha realizado estudios, de las cuales 21 tienen posibilidad de extracción de vapor de agua para generación de electricidad. El país cuenta actualmente con cuatro campos geotérmicos en desarrollo: Cerro Prieto, en Baja California; Los Azufres, en Michoacán; Los Humeros, en Puebla; y La Primavera, en Jalisco. Las reservas probables de energía geotérmica ascienden a 4 600 megavatios. Además existen más de 20 zonas de bajo poder calorífico, no adecuadas para aprovechamiento eléctrico de carácter geotérmico pero que constituyen magníficos polos de futuros desarrollos turísticos.

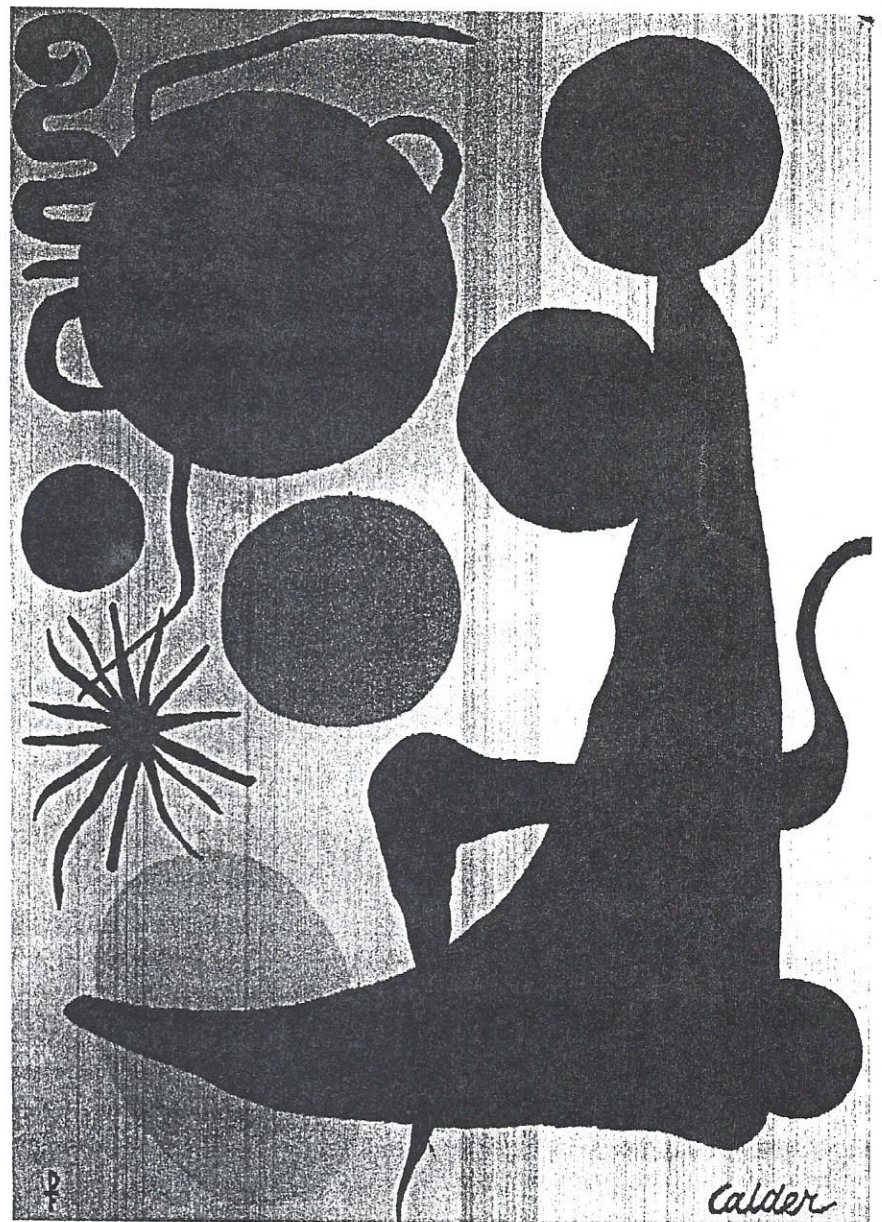
crementa debido a la presencia de cloruro y sulfuro de hidrógeno, que forman compuestos complejos con los metales.

Es común que en las descripciones de los depósitos minerales se haga referencia también a los minerales de alteración que los acompañan, y probablemente muy pocos geólogos podrán negar que tales zonas de alteración son guías muy útiles para la exploración de minerales. La alteración, aun la restringida a zonas de fracturas, puede ser el indicio de una intensa mineralización a una profundidad mayor.

Teorías de mineralización hidrotermal

Aunque los manantiales termales mineralizados deben haber sido notados desde los albores de la humanidad, no fue sino hasta mediados del siglo XVI, con la publicación de varias obras entre las que destaca *De re metallica*, cuando el minero alemán Georgius Agrícola planteó con una extraordinaria percepción cuatro postulados fundamentales que siguen teniendo vigencia en la actualidad: 1) que las vetas de minerales son fisuras de origen posterior al de las rocas encajonantes; 2) que las soluciones son de agua de origen meteórico; 3) que la fuente de los metales son las rocas por las que circulan las soluciones; y 4) que el agua al descender se calienta y disuelve los metales de las rocas por las que circula, para luego redepositarlos al ascender.

Después vendría la famosa controversia entre James Hutton, quien sostenía la hipótesis del "plutonismo", la cual consideraba que todas las rocas y los minerales son producto de los magmas del interior de la Tierra, y Abraham Gottlob Werner, quien pro-



pugnaba la hipótesis del "neptunismo", la cual postulaba que todas las rocas, incluyendo las ígneas y aquellas que resultan de depósitos minerales, se acumularon como sedimentos clásticos o por precipitación química en un océano primigenio.

En 1847 inicia la época moderna con Élie de Beaumont, quien expresó que muchos de los depósitos minerales fueron formados por soluciones hidrotermales derivadas de fuentes

ígneas (volcánicas e intrusivas). Cuarenta años más tarde, Daubreé estuvo de acuerdo en que al menos algunos yacimientos minerales fueron formados por aguas termales, pero que éstos tenían un origen superficial, de aguas meteóricas. La mineralización en el fondo del mar por manantiales termales fue postulada desde hace casi un siglo para explicar los depósitos de hierro bandeado, que constituyen alrededor de 90% de las reservas mun-

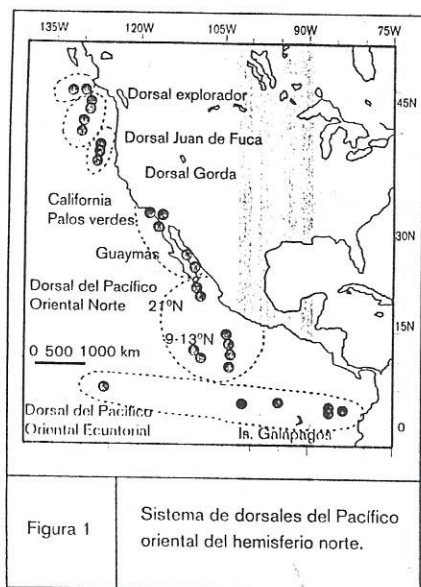


Figura 1 Sistema de dorsales del Pacífico oriental del hemisferio norte.

diales, y de manganeso estratificado. Esa hipótesis se hizo extensiva a los depósitos de sulfuros masivos, y fue comprobada al descubrirse que en el mar Rojo se están depositando sedimentos metalíferos precipitados a partir de fluidos de alta salinidad.

Respecto a la sistematización de los depósitos minerales, correspondió a Lindgren establecer en 1933 el sistema de clasificación más usado y que en esencia aún nos rige. De él es la idea de que los depósitos fueron formados en su mayoría por sistemas hidrotermales, por lo que es considerado como el máximo exponente del hidrotermalismo.

En 1955 White realizó una profunda investigación de los minerales relacionados con manantiales termales, publicó los resultados de cuatro sistemas de connotación mundial, que incluyen *Upper y Morris Basin* del Parque Nacional Yellowstone, *Steamboat Spring* en Nevada, y *Wairakei* en Nueva Zelanda. Éstos se caracterizan por altas temperaturas en la superficie y a profundidad, un origen volcánico, alta radiación de calor y precipitación

de minerales. Antes de este estudio se pensaba que el magma era la fuente tanto del agua como de los metales, a pesar de que Agricola y Daubrée ya habían considerado el agua meteórica dentro de los fluidos mineralizantes; por ejemplo, Bateman conjeturaba en 1950 que los depósitos se formaban a grandes profundidades, a las que el agua meteórica no tenía acceso; no obstante, White notó que algunos depósitos de mercurio estaban obviamente relacionados con manantiales termales y que los manantiales de alta temperatura que depositaban el precipitado químico llamado "sinter" eran el equivalente moderno de los depósitos epitermales de oro y plata, por lo que a dicho autor se atribuye el reconocimiento moderno de la participación del agua meteórica en los sistemas hidrotermales.

En 1974, el mismo autor propuso una clasificación del agua en seis tipos genéticos: 1) meteórica, originada en la superficie; 2) marina; 3) conata, la atrapada en los poros de la roca; 4) metamórfica, asociada o re-

sultante de procesos metamórficos; 5) magmática, sin considerar su origen inicial; y 6) juvenil, que surge a la superficie por primera vez. En cuanto a la composición de los fluidos, ésta depende principalmente de cuatro factores: 1) tipo y composición del magma parental y su historia de cristalización; 2) condiciones de presión y temperatura; 3) mezcla con aguas de otras fuentes; y 4) asimilación de la roca encajonante.

La teoría de la tectónica de placas, surgida en la década de los sesentas, condujo a la postulación de la existencia de manantiales termales submarinos. Para comprobar lo anterior se efectuó un estudio de investigación con el submarino *Alvin*, de la *Woods Hole Oceanographic Institution*, guiado por la cartografía del fondo oceánico. En dicho estudio se descubrió, en 1977, a 330 kilómetros al nordeste de las Islas Galápagos y a 1 500 metros de profundidad, el primero de tales manantiales, el ahora célebre *Rose Garden*. Este manantial expulsaba agua ligeramente tibia, de tempera-

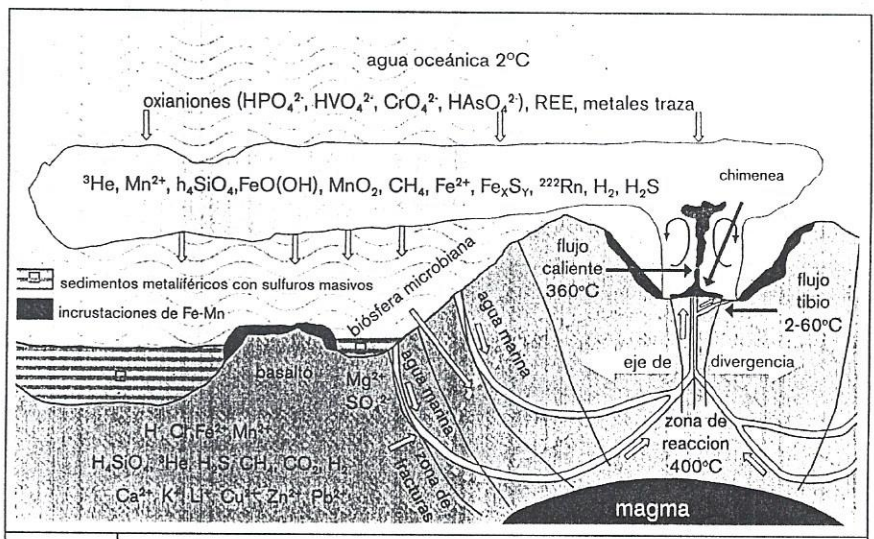
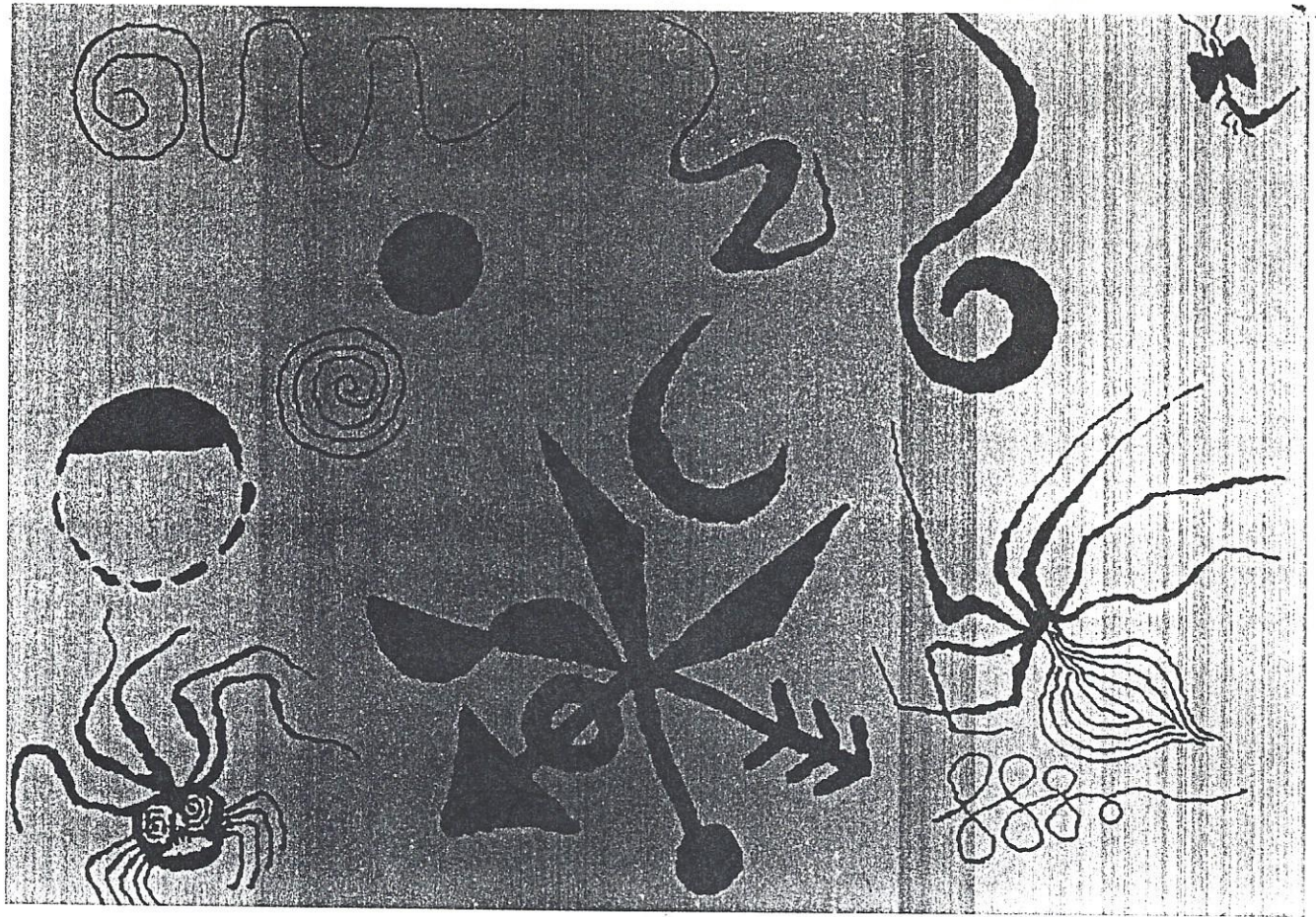


Figura 2 Esquema de celda hidrotermal en las dorsales oceánicas.



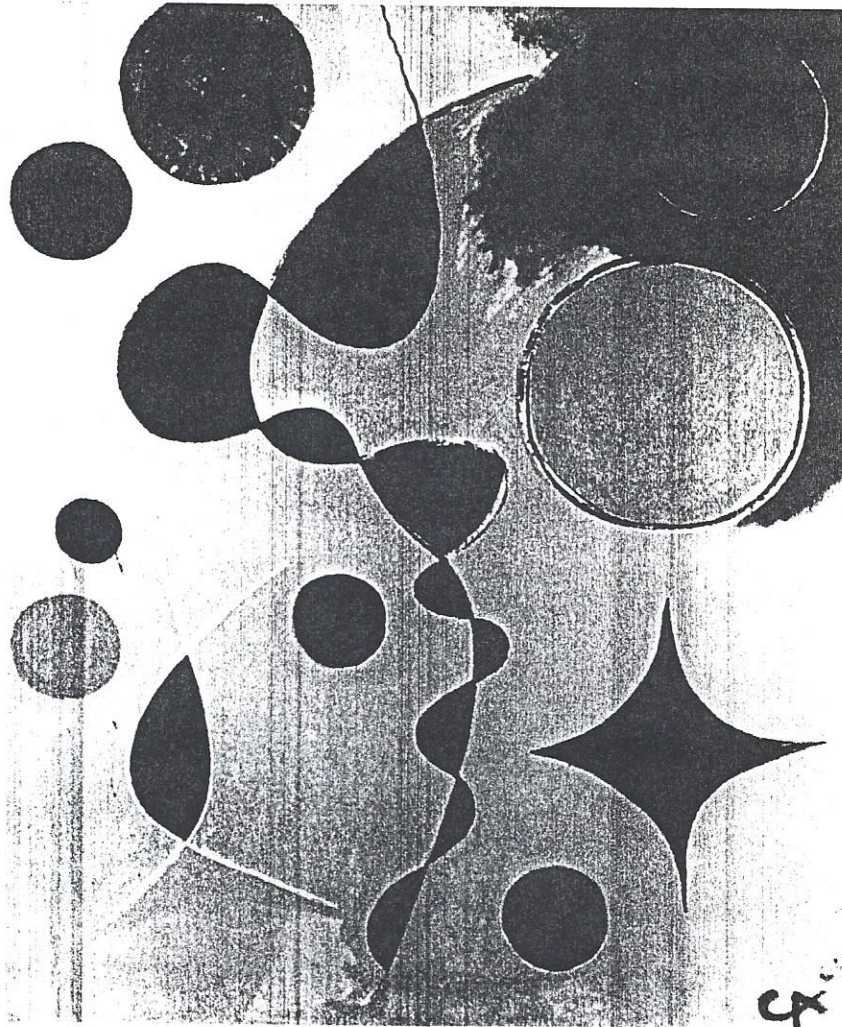
tura cercana a 25 °C, que contenía ácido sulfhídrico. Hasta entonces se consideraba que a tales profundidades, en una oscuridad total, sólo podía existir una vida exigua, que subsistía sólo de los organismos nadadores muertos que cayeran al fondo; no obstante, el submarino se encontró con una abundante vida alrededor del manantial. En este ambiente, la base de la pirámide alimentaria está constituida por bacterias que fabrican sus propios alimentos, utilizando como fuente de energía el ácido sulfhídrico mediante el proceso llamado quimiosíntesis. Rodeando la abertura se encontraban enormes gusanos en forma de tubo (*Riftia pachyptila*) de color blanco y cerca de 1.80 metros de longitud, y de su parte superior emergían gusanos

de color rojo que alojaban en sus tejidos una gran cantidad de dichas bacterias, formando una simbiosis; además se hallaron almejas y mejillones de hasta 25 centímetros. En contraste, en las dorsales del Atlántico sólo se hallarían camarones ciegos.

Las ventilas hidrotermales se distribuyen a lo largo de todo el sistema de dorsales oceánicas que circundan el globo con una longitud de 46 000 kilómetros. En la figura 1 se muestran los centros de mineralización hidrotermal reconocidos en el sistema de dorsales del Pacífico oriental en el hemisferio norte.

En la figura 2 se ilustra esquemáticamente el fenómeno de mineralización hidrotermal que se origina a través de las ventilas hidrotermales.

La zona aledaña a las dorsales se encuentra sujeta a esfuerzos de tensión que producen grietas profundas. A través de ellas el agua marina, fría y densa, se infiltra a grandes profundidades, donde se calienta por la cercanía del magma. Al ser calentada, el agua incrementa en gran medida su poder de disolución y lixivia las rocas basálticas que constituyen la corteza oceánica, las cuales contienen en cantidad reducida una gran diversidad de elementos metálicos que pasan en solución a los fluidos hidrotermales. Estos fluidos resultan afectados por una gran multiplicidad de factores que determinan su carácter fisicoquímico extraordinariamente complejo. Debido al incremento en su temperatura, los fluidos inician su ascenso



hacia la superficie del fondo marino, donde los metales transportados en solución y el ácido sulfhídrico contenido en los fluidos, al entrar en contacto con el agua, reaccionan para formar sulfuros metálicos, principalmente de hierro, mismo que le confiere a las columnas de fluidos emergentes un característico color negro que les ha valido el nombre en inglés de *black smokers*. El valor económico o no de un depósito de los llamados "sulfuros masivos vulcanogénicos" así formados depende del tiempo que opere el sistema convectivo descrito, el cual debe alimentar el depósito en forma constante. Esto no es fácil,

ya que existen muchos agentes que pueden interrumpir el desarrollo del hidrotermalismo. Como ejemplo de ello, puede citarse el del mismo *Rose Garden*, que al ser visitado nuevamente en 2002 para celebrar el 25 aniversario de su descubrimiento, había sido tapado por un derrame de lava y su sistema convectivo había encontrado salida en otro sitio relativamente cercano, que fue llamado *Rosebud*.

El sistema global de dorsales oceánicas está sujeto a variaciones eventuales en su comportamiento tectónico. Actualmente se considera que el sistema del Pacífico influye en la

circulación de las corrientes marinas y el comportamiento de los fenómenos climáticos mundiales, como el llamado "El Niño".

El inicio de la vida

Las etapas iniciales de la vida se sobrepone en el tiempo a un intenso periodo de bombardeo meteorítico sobre la Tierra, hace 4 000 a 3 800 millones de años. Para algunos investigadores, el desarrollo de la vida pudo haber sido frustrado por los impactos de grandes meteoritos, los cuales alteraron y en parte destruyeron este hábitat primitivo. Así, los modelos

simulados indican que un impacto de 500 kilómetros de diámetro habría creado una atmósfera de vapor de agua y roca fundida que en un periodo de pocos meses evaporó los océanos. Esta atmósfera vaporizada habría producido climas lluviosos con duración de varios miles de años, que restablecieron los anteriores océanos. Pero los eventos meteoríticos arcaicos también pudieron eliminar a casi todos los organismos establecidos en la superficie y permitir únicamente la subsistencia de las especies hipertermófilas. Si este escenario fue real, entonces el ancestro común en el árbol genealógico de la vida en la Tierra sería un organismo termófilo ligado a los impactos meteoríticos.

Para algunos investigadores, hace unos 3 500 millones de años, un poco después de los procesos de acreción y compactación gravitacional del polvo y los gases que crearon la Tierra, comenzaron a generarse los primeros elementos orgánicos, los cuales con el tiempo se volvieron más complejos y formaron las moléculas de ARN que se caracterizan por su capacidad de duplicación. ¿Como se estructuró el ARN? Todavía es un misterio. Las primeras células se parecían mucho a los modernos procariontes o a los organismos conocidos como arquea, que se generan en ambientes de alta temperatura. Tanto los modernos como los antiguos procariontes no tienen núcleo, únicamente sostienen en su interior pequeñas cantidades de material genético dentro de un citoplasma gelatinoso. Hace unos 2 000 millones de años aquellas células primitivas evolucionaron a organismos que incorporaban en su interior partes especializadas. Al principio se reproducían por división en dos partes idénticas, tal como lo hacen

bacterias y arqueas en la actualidad. Un poco después, las eucariotas comenzaron a reproducirse combinando material genético de dos progenitores. Lo anterior constituye el inicio de la reproducción sexual, que incrementa la variabilidad genética y conduce a la profusión de diferentes formas de vida e intensifica el ritmo de la evolución. Así, muchas estructuras celulares y los procesos que las generan persisten en una amplia variedad de líneas evolutivas, una de las cuales conduce al ser humano.

Biogénesis

Los sistemas hidrotermales han jugado un papel fundamental en la evolución temprana de la Tierra y en los procesos endógenos para la síntesis de los compuestos orgánicos que constituyen los ladrillos básicos de la vida. La información genética codificada en el genoma de las especies termófilas, amantes del calor, son claves importantes en la evolución de la biósfera temprana. Por lo general los ambientes hidrotermales precipitan grandes cantidades de minerales favorables para la captura y preservación del registro fósil, lo que permite la integración de estudios de sedimentología microbiana, paleontología y geoquímica, como los que se efectúan actualmente en *Yellowstone*.

Las investigaciones que se realizan demuestran que los sistemas hidrotermales podrían haber constituido los ambientes adecuados para la síntesis prebiótica de los compuestos orgánicos necesarios para la vida y también un lugar para el origen de la misma. Incluso podrían ser el refugio o el ambiente extremo de los primeros organismos termófilos que aparecieron en la Tierra. Tales estudios



conducen a refinar las estrategias para las investigaciones de huellas de materiales prebióticos o el inicio de la vida.

Un importante campo de estudio que se está iniciando es el del sustrato microbiano dentro de los sistemas hidrotermales desarrollados en rocas máficas y ultramáficas en el fondo marino. En este tipo de ambiente, importante por su extensión ya que no está circunscrito a las dorsales, el calor es provisto por las reacciones de serpentinización, que consisten en la alteración, debida al agua marina, de los silicatos ricos en magnesio, principalmente olivino, que son minerales abundantes en este tipo de rocas, sobre todo en las ultramáficas. Durante la serpentinización hay liberación de metano e hidrógeno, que son aprovechados por los microorganismos autótrofos.

Además, los procesos hidrotermales tienen una íntima relación con la formación y evolución planetaria, y es muy probable que existan, o hayan existido, en otros cuerpos del siste-

ma solar. Por ello los sistemas hidrotermales y sus depósitos se consideran como objetivos primordiales para buscar evidencias fósiles de vida dentro del sistema solar.

Existe la fundada sospecha de la existencia de fluidos bajo la superficie de algunos cuerpos planetarios de nuestro sistema solar. Los resultados de Europa, la luna helada de Júpiter, enviados por la sonda Galileo permiten considerar a este satélite como un importante objetivo para la exploración de sistemas hidrotermales extra-terrestres. Desde hace algún tiempo se investiga si los cometas y meteoritos carbonosos han aportado una cantidad significativa de material orgánico prebiótico, que posteriormente fuera utilizado en los procesos de la generación de la vida inicial.

También hay la posibilidad de que hayan existido sistemas hidrotermales en la historia temprana de los asteroides externos (ceranos a Júpiter), los cuales se consideran relacionados con las condritas carbonosas. En estos asteroides existen minerales ori-

ginados por alteración hidrotermal que ocurre, por lo común, entre 50 y 100 °C. Además se considera probable la existencia de ambientes hidrotermales en la historia temprana de Marte. Se piensa que fueron comunes los depósitos de composición silícea, producidos por acción hidrotermal, pero desaparecieron hace unos 3 500 millones de años. Aun así, se especula sobre la posible existencia de agua en el subsuelo de ese planeta. Estas ideas se apoyan en la presencia de canales, dispersos caóticamente, que aparecen alrededor de los cráteres de impacto sobre la superficie del planeta. Éstos pueden haberse formado por la aportación catastrófica de un gran volumen de agua proporcionada por acuíferos subterráneos poco profundos. Al mismo tiempo, los espectrómetros de emisión para la detección de anomalías térmicas han descubierto hematita especular en superficies específicas de ese planeta; en el ambiente terrestre, dichos depósitos se precipitan únicamente en ambientes hidrotermales. ©V



Jerjes Pantoja Alor

José Arturo Gómez Caballero

Instituto de Geología,
Universidad Nacional Autónoma de México.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bateman, A. 1950. *Economic mineral deposits*. Wiley, Nueva York (2.ª ed.).
- Beaumont, É. 1847. *Note sur les émanations volcaniques et métallifères*, en http://gallica.bnf.fr/Fonds_Frertext/T0088272.htm.
- Butterfield, D. A. 2002. *Context of hydrothermal venting in the chemical balance of the Earth*, en http://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/02fire/background/vent_chem/ventchem.html.
- Daubrée, G. A. 1887. *Les eaux souterraines aux époques anciennes*. Paris.
- Agricola, Georgius. *De re metallica*. (1.ª edición en latín de 1556). Traducido en 1912 por Hoover, H. C. y L. H. Hoover. Dover, Nueva York, 1950.
- Lindgren, W. 1933. *Mineral deposits*. McGraw-Hill, Nueva York (4.ª ed.).
- Miller, A. R. 1964. "High salinity in sea water", en *Nature*, vol. 203, pp. 590-594.
- Oftedahl, C. 1958. "A theory of exhalative-sedimentary ores", en *Geol. Foren. Stockholm. Forh.*, vol. 80, pp. 1-19.
- Van Hise, C. R. y C. K. Leith. 1911. "The geology of the Lake Superior iron region", en *U.S. Geological Survey Monograph*, núm. 52, p. 641.
- White, D. E. 1955. "Thermal springs and epithermal ore deposits", en *Economic Geology*, Fiftieth Anniversary Volume, pp. 99-154.
- White, D. E. 1974. "Diverse origins of hydrothermal ore fluids", en *Economic Geology*, vol. 69, pp. 954-973.

IMÁGENES

Alexander Calder. P. 15: *Fondo Claro*, 1949. P. 17: *Bola verde*, 1971. P. 19: *Araña*, 1950. P. 20: *Forma sinuosa*, 1963. P. 21: *Floreecer*, 1947; Sin título, 1950.

FIGURAS

1. Compilado por Mark Hannington, en <http://triton.ori.u-tokyo.ac.jp/~intridge/images/nepacific.gig>.

2. Basada en Butterfield, D.A., 2002.