

## **Evidencia mineralógica del efecto de fluidos ácidos sobre las rocas del yacimiento de Los Humeros, Puebla**

**Georgina Izquierdo Montalvo, Alfonso Aragón Aguilar, F. Rafael Gómez Mendoza\* y Siomara Blanco López**

Instituto de Investigaciones Eléctricas, Reforma 113, Col. Palmira, Cuernavaca Morelos, CP 62490.

\*Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso Jiutepec, Morelos, 62550. Correo: [gim@iee.org.mx](mailto:gim@iee.org.mx)

### **Resumen**

El campo geotérmico de Los Humeros (CGLH) ha sido tema de innumerables estudios en muy diversas disciplinas. Es un campo de vapor dominante, de alta temperatura a fondo de pozo y baja permeabilidad de las rocas del yacimiento, con una característica más que es la producción de fluidos ácidos, evidenciados por la acelerada corrosión que se ha observado en las tuberías de producción de algunos pozos del campo. Sobre esta última característica se han realizado varios estudios, que han concluido con diversas propuestas sobre la naturaleza y el origen de esos fluidos. Entre otras ideas, se ha mencionado la existencia de un yacimiento de tipo ácido, pero se ha descartado porque no se han identificado minerales de alteración típicos de la interacción de la roca con fluidos de pH bajo. Al contrario, la evidencia mineralógica indica que la alteración hidrotermal de las rocas del subsuelo en el yacimiento de Los Humeros es típica de la interacción de rocas con fluidos con pH de neutro a alcalino. El núcleo del pozo H-26, cortado a 2000 m de profundidad, proporciona evidencias de un proceso de lixiviación por efecto de fluidos ácidos. El estudio detallado de este núcleo ha permitido reconocer varios procesos ocurridos en la zona centro-oriental del campo geotérmico. El núcleo conserva la textura de una andesita y trazas de minerales de alteración como clorita y muy escasa pirita, y ha sido completamente alterado dejando lo que se conoce como un esqueleto silicificado. Al microscopio y por difracción de rayos X se observa cuarzo microcristalino, fenocristales de plagioclasas y trazas de clorita y de pirita. La observación del entorno del núcleo permite suponer la existencia de un conducto lateral por donde circulan o circularon fluidos corrosivos. Este trabajo forma parte del estudio petrológico y de ingeniería de yacimientos de la zona centro del CGLH.

*Palabras clave:* Los Humeros, fluidos ácidos, mineralogía hidrotermal, difracción de rayos X.

### **Introducción**

Es bien conocido que las rocas y los fluidos en un yacimiento geotérmico reaccionan entre sí provocando cambios en la composición química del fluido y de la roca y dando lugar a la formación de nuevas fases. El tipo y abundancia de minerales hidrotermales depende de varios factores como la temperatura, composición química del fluido, pH, disponibilidad del fluido (permeabilidad), etc. La identidad de un mineral o de una asociación mineralógica es un registro de los procesos y condiciones ocurridos en el yacimiento.

La formación de minerales ocurre a través de varios mecanismos. Por ejemplo, la ilita, adularia, pirita, pirrotita, hematita, zeolitas (laumontita, mordenita, wairakita) y epidota se forman por depósito directo. También es común encontrar cuarzo, clorita, calcita y anhidrita en vetas y cavidades. Otro mecanismo de formación es el remplazamiento de minerales inestables por otros de mayor estabilidad en el ambiente térmico. Por ejemplo, el vidrio volcánico es remplazado por zeolitas (mordenita y laumontita), cristobalita, cuarzo y esmectitas (montmorillonita). Otro proceso de alteración de las rocas

es por lixiviación. Este ocurre generalmente donde el vapor condensado es acidificado por oxidación del  $H_2S$ , atacando la roca y disolviendo la mineralogía primaria sin remplazamiento de las cavidades formadas en este proceso.

Básicamente se han reconocido dos tipos de alteración hidrotermal (Reyes, 1990). Uno es la alteración neutra por la interacción de la roca con un fluido de pH neutro a básico, comúnmente clasificado como clorurado sódico de alta temperatura. Este tipo de alteración produce minerales arcillosos, pirita, calcita, clorita, cuarzo, zeolitas, epidota, biotita, etc. El otro tipo es la alteración ácida formada por el contacto de las rocas con fluidos de pH bajo o fluidos ácido-sulfatados. Este tipo de alteración da lugar a caolinita, dickita, pirofilita (a mayor temperatura), diáspora, andalucita, zunyita, turmalina, lazulita, etc. La Tabla 1 presenta un resumen de la ocurrencia de minerales hidrotermales en función de la temperatura y del pH.

pH	< 100°C	< 200°C	300°C y > 300°C
Medio ácido	Cristobalita, caolinita, halloysita, alunita	Caolinita, cuarzo, alunita, pirita, Ilita	Diásporo, pirofilita, cuarzo, pirita
Medio cercano a neutro	Esmectita, Minerales interestratificados	Minerales Interestratificados Ilita, clorita, feldespatos	Ilita, Actinolita, Epidota
Medio neutro a alcalino	Zeolitas Minerales arcillosos (esmetctitas)	Zeolitas, prehnita, Clorita, cuarzo, Calcita	Wairakita, epidota Clorita, biotita, Prehnita, anfíboles

*Tabla 1. Ocurrencia de minerales hidrotermales en función de la temperatura y del pH.*

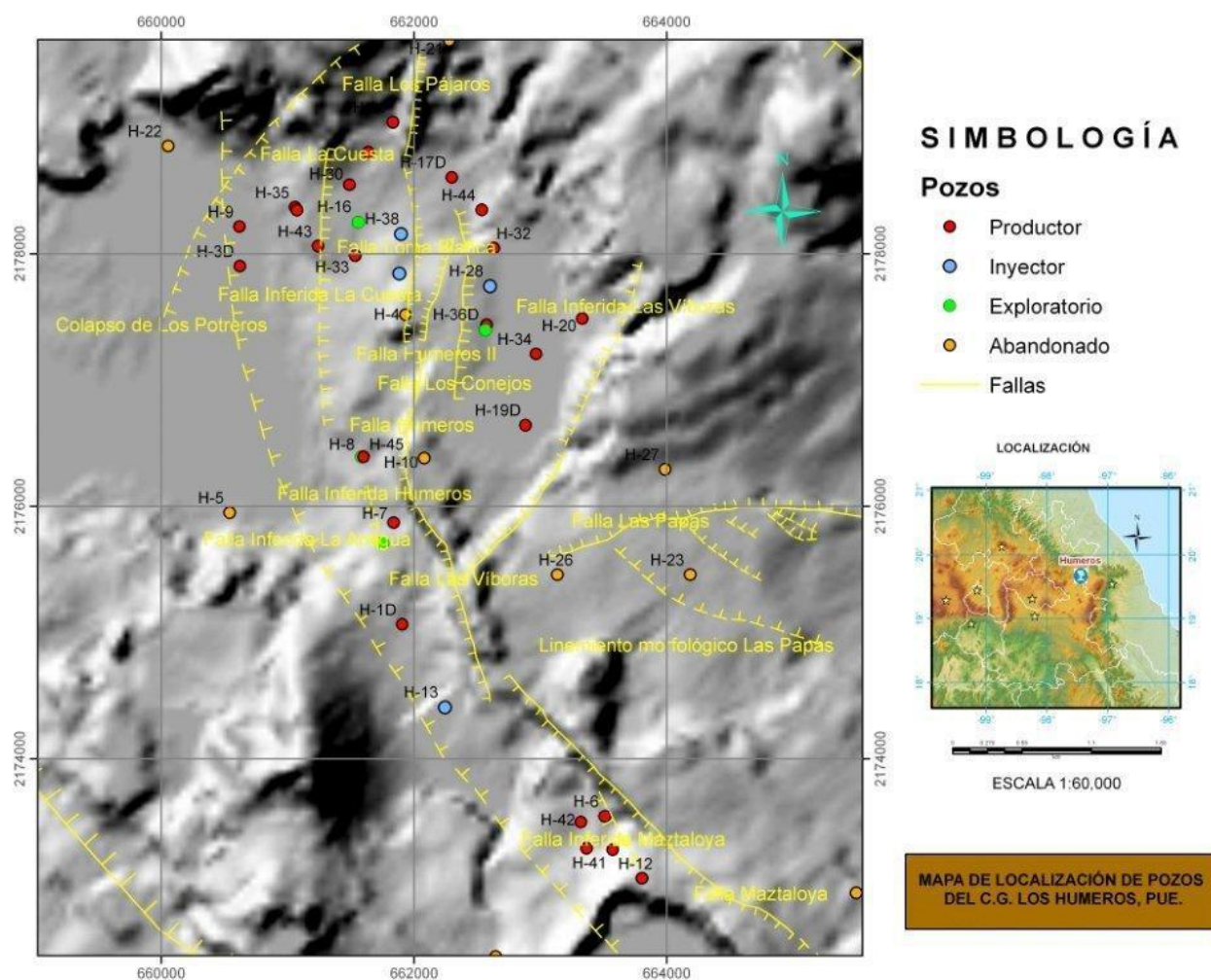
La alteración hidrotermal generada por cualquier mecanismo provocará cambios en las propiedades de las rocas, modificando su densidad, porosidad, permeabilidad (ya sea aumentándolas o disminuyéndolas), en su fuerza magnética y en su resistividad (disminuyéndola). El conocimiento teórico y la observación práctica de la alteración en sistemas hidrotermales son fundamentales para comprender los procesos que han ocurrido en un yacimiento geotérmico.

Siendo la mineralogía hidrotermal un testigo de las condiciones del yacimiento geotérmico antes de la explotación del recurso, los minerales o asociaciones de minerales hidrotermales se emplean como indicadores de temperatura, permeabilidad, medios ácidos, etc. Entre ellos algunos de los más sintomáticos son calcita, epidota, hematita, zeolitas y minerales arcillosos. La calcita se asocia a zonas de ebullición en las que se depositan cristales de calcita debido a la pérdida de  $CO_2$ . Se ha sugerido que la cementación por calcita es muy posible cuando fluidos de baja temperatura encuentran rocas calientes. La epidota ha sido reconocida como indicador de alta temperatura, aunque su formación se ha reportado a menos de 200°C. La hematita se ha asociado a entradas de agua fría. Las zeolitas se han utilizado como termo indicador, ya que en algunos campos muestran una sucesión de especies de baja a alta temperatura. Los minerales arcillosos son muy susceptibles a mostrar cambios químicos en su estructura como respuesta a la química del fluido con el que interactúan. En yacimientos en los que la

variación litológica es mínima, se ha observado una evolución en función de la profundidad y de la temperatura del medio (Cathelineau e Izquierdo, 1988; Izquierdo, 1993). En este trabajo se presenta la única evidencia mineralógica del efecto de fluidos ácidos sobre rocas del yacimiento en el campo de Los Humeros, Puebla.

## El campo geotérmico de Los Humeros

El campo geotérmico de Los Humeros (CGLH) se localiza en la porción oriental del Cinturón Volcánico Mexicano, entre los estados de Puebla y Veracruz (Figura 1). Dentro del campo se han identificado varias estructuras geológicas. En una de ellas, conocida como la Caldera de Los Potreros, se han perforado unos 40 pozos a profundidades mínimas de 1500 m y máxima de 3100 m (pozo H-12). El CGLH es la tercera fuente generadora de energía geotermoeléctrica en la República Mexicana. En la misma Figura 1 se presentan los pozos actuales y principales estructuras del campo.



*Figura 1. Mapa del campo geotérmico de Los Humeros con la localización de los pozos y las principales fallas.*

La geología del subsuelo del campo ha sido descrita por varios autores (Gutiérrez-Negrín, 1982; Viggiano y Robles, 1988; Cedillo, 1997). Básicamente se reconocen cuatro unidades de espesor

variable, con intercalaciones de rocas de distinta composición. No todas ellas se presentan en todos los pozos. Estas unidades son:

Unidad 1. Vulcanismo post-caldera. Edad cuaternaria (>100,000 años). Compuesta por andesitas, basaltos, dacitas, riolitas, flujos y tobas de ceniza, pómez, ceniza y material de erupciones freáticas.

Unidad 2. Vulcanismo caldérico. Edad cuaternaria (510,000-100,000 años). Compuesta principalmente por ignimbritas líticas y vítreas de dos colapsos caldéricos (Los Humeros y Los Potreros). Incluye pómez, tobas y algunas coladas de lava andesítica, así como domos riolíticos.

Unidad 3. Vulcanismo pre-caldérico. Edad terciaria (Mioceno-Plioceno, 10-1.9 Ma). Compuesta por flujos de lava andesítica con algunas intercalaciones de horizontes de tobas. El mineral accesorio característico de las andesitas es augita en zonas someras y hornblenda en zonas profundas. Esta unidad incluye flujos locales y menores de basalto, dacita y eventualmente riolita. Esta unidad es la que contiene los fluidos geotérmicos.

Unidad 4. Basamento. Edad Mesozoico-Terciario (Jurásico-Oligoceno, 140-31 Ma). Compuesta por calizas y lutitas subordinadas y pedernal intrusionadas por granito, granodiorita y tonalita y parcialmente metamorfizadas a mármol, skarn y hornfels. Se observan eventualmente algunos diques diabásicos a andesíticos más recientes (Mioceno).

### **Mineralogía hidrotermal**

Los estudios mineralógicos realizados en muestras de las rocas cortadas durante la perforación de los pozos han mostrado la ocurrencia de asociaciones de minerales formados por la interacción de fluidos neutros o básicos en distintos rangos de temperatura. Los principales minerales de alteración identificados son clorita, epidota, cuarzo, calcita, leucoxeno (en baja proporción) y pirita. Además de ellos, se han identificado esmectitas, caolinita, ilita y en menor grado minerales interestratificados, zeolitas sin indicar la especie, anhidrita, anfíbol, granate, diópsido y wollastonita.

El análisis por difracción de rayos-X de la fracción arcillosa de pozos como el H-14, H-15, H-17 y H-29 (Libreros, 1991; Izquierdo, 1993) indicó la presencia de caolinita únicamente en ignimbritas. Las zeolitas son sílico-aluminatos hidratados de Na y de Ca que responden a cambios estructurales en función de la temperatura y de la composición de la roca y del fluido. La wairakita es la especie menos hidratada, ocurriendo en un rango de temperatura entre 200 y 250 °C. Por lo general las zeolitas aparecen como depósitos masivos con distintos grados de cristalinidad, ocupando cavidades o rellenando vetillas. La información mineralógica de los estudios realizados por la CFE reporta la presencia de zeolitas, sin indicar la especie, pero es probable que el proceso de acidificación limitara la formación de wairakita o bien, si esta existió a profundidad, el fluido ácido la disolvió.

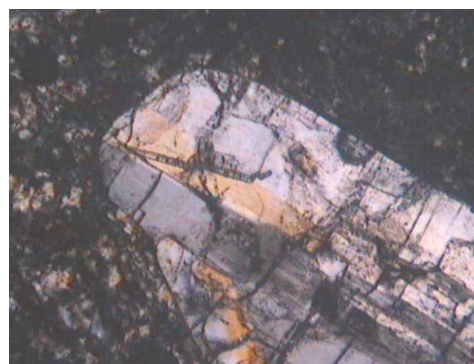
La intensidad de la alteración de las rocas es variable y ha dependido de la permeabilidad de las rocas y de la recarga al yacimiento. No se observan series evolutivas de minerales termo indicadores como filosilicatos y zeolitas, como sí ocurre en otros yacimientos geotérmicos.

La alteración argílica superficial observada en algunas de las zonas del campo es evidencia de aguas ácido-sulfatadas que indican un medio oxidante y condiciones de pH bajo. Esas aguas derivan de la formación de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> que asciende y desciende alterando las rocas y la zona de descarga a la superficie,



dejando por lo general un halo blanquecino. El análisis por difracción de rayos-X de muestras superficiales cercanas a los pozos H-4, H-7, H-19 y cerca de la zona del Xalapazco Maztaloya, mostró la presencia de minerales típicos de alteración argílica (Arellano et al., 1998) como son alunita, caolinita, yeso, jarosita, alunógeno y alumbre. Las zonas de alteración argílica superficial parecen estar alineadas con la traza de una falla local conocida como PH y otras se localizan próximas a la falla Antigua.

No se han identificado minerales que indiquen la interacción de las rocas con fluidos ácidos en las zonas profundas del campo. Pero hay una evidencia de la esa interacción en el núcleo 4 del pozo H-26, cortado a 2000 m de profundidad. Este núcleo ejemplifica el proceso de lixiviación que afectó prácticamente a toda la roca. Se trata de una roca de color crema muy silicificada, que conserva fenocristales relictos de plagioclasas y trazas de minerales como clorita y pirita. La Figura 2 muestra un fragmento de ese núcleo y una micrografía en la que se observa un fenocristal de plagioclasas inmerso en una masa de cuarzo micro cristalino.



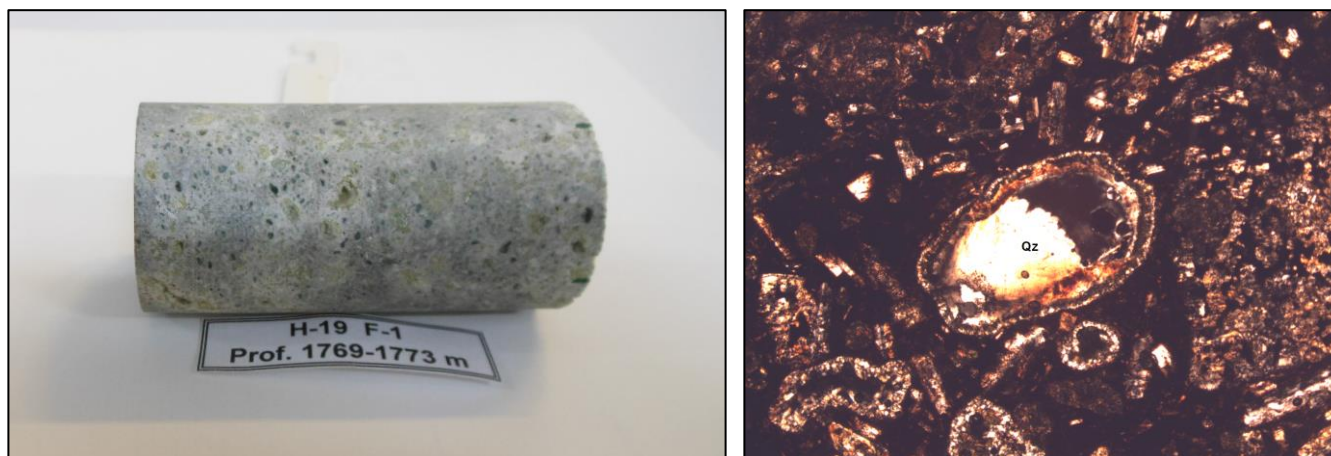
*Figura 2. Fragmento del núcleo 4 del pozo H-26, cortado a 2000 m de profundidad, a la izquierda. A la derecha, una micrografía (50 aumentos, luz polarizada) mostrando un fenocristal de plagioclasas inmerso en una masa de cuarzo micro cristalino.*

En núcleos de otros pozos del mismo campo puede observarse la sucesión de eventos hidrotermales: uno de ellos relacionado con alteración hidrotermal de tipo propilítico (cuarzo, epidota, calcita) y otro con la lixiviación y disolución parcial generando vesículas, a veces vacías o parcialmente rellenas de otro mineral secundario. Una muestra del núcleo 1 del pozo H-19, tomado a 1769 m de profundidad, muestra el efecto de lixiviación y disolución de la roca dejando cavidades, vetas y vetillas sin relleno. La Figura 3 muestra a la izquierda un fragmento de ese núcleo, en el que se notan algunas vesículas mostrando halos de epidota y cuarzo. Es una roca andesítica de la que se incluye a la derecha de la figura una micrografía con luz polarizada (nícoles cruzados) del mismo núcleo, mostrando texturas porfídica y amigdaloides. Se nota una amígdala con un halo de cuarzo y epidota, en cuyo centro han crecido cristales de cuarzo secundario.

### **Características de la química de fluidos acuosos**

En general, los fluidos producidos por los pozos se han clasificado como clorurados sódicos y sulfatados. Tienen una alta concentración de boro, relativa alta concentración de Si y baja concentración de otros cationes como Na, K, Ca y Mg. A pesar de la naturaleza ácida del fluido, en la mayoría de los pozos se reporta un pH cercano al neutro con baja concentración de Cl. Dados los

efectos corrosivos de los fluidos, sería de esperar un exceso de cloruros en el líquido muestreado, lo cual no ocurre.



*Figura 3. A la izquierda un fragmento de un núcleo del pozo H-19. A la derecha micrografía del mismo núcleo mostrando texturas porfídica y amigdaloides. La amígdala al centro está rellena con cuarzo y epidota.*

La mayoría de los pozos productores han ido disminuyendo su fracción líquida y aumentando la fracción de vapor, lo cual favorece el transporte de especies volátiles. Las características químicas de los fluidos líquidos son propias de un condensado de vapor en el que la mayoría de los componentes se encuentran en baja concentración, con la excepción del boro y la sílice. La alta concentración de boro se ha asociado a la movilidad de especies magmáticas. Pero a pesar de esa alta concentración el boro en el fluido, no llegó a ocurrir intercambio con las rocas y para formar minerales indicadores de ambiente ácido. El condensado carece de la composición química que posibilite el intercambio con la roca, y la consecuente formación de nuevos minerales. Por su parte, la relativamente alta concentración de sílice puede deberse a la interacción del condensado ácido con rocas que han sido afectadas por procesos de lixiviación. Estas rocas estarían disminuidas en Na, K, Ca y Mg, y el cuarzo micro cristalino es susceptible a entrar a la solución.

### **Evidencias mineralógicas del efecto de fluidos ácidos en el pozo H-26**

El pozo H-26 se perforó en 1988 en la zona orientada del CGLH, en la parte central del Colapso de Los Potreros, a unos 1360 m E-NE del pozo H-1, 950 m al W-SW del pozo H-23 y a 2100 m N-NW del pozo H-6 (ver Fig. 1). Llegó a una profundidad de 2547 m, con una temperatura estabilizada de 378°C. Cada uno de esos pozos presenta características de producción muy diferentes, estando cerrados en observación los pozos H-23 y H-26.

De 1930 m a 2000 m de profundidad se describió la ocurrencia de rocas de composición ácida (riodacita y andesita silicificada) en el pozo H-26. A partir de 2000 m se reporta un paquete andesítico hasta 2350 m, en donde se encuentra en contacto con un horizonte basáltico que se prolonga hasta 2458 m que a su vez descansa sobre un cuerpo intrusivo de composición granodiorítica de biotita y hornblenda, volviendo a presentarse andesitas hacia el fondo del pozo (2530 a 2547 m). También se reportó un incremento de boro en el lodo durante la perforación del pozo, alcanzando su máxima concentración (862 ppm) a 2300 m de profundidad.

Se cortaron cinco núcleos en el pozo H-26, cuyas características son las siguientes:

Núcleo 1, 350-353 m de profundidad. Toba vítrea de color gris-crema claro. El núcleo es homogéneo, con algunos fragmentos mostrando vetas selladas, y otros con cavidades vacías o rellenas.

Núcleo 2, 1200 a 1203 m. Núcleo extremadamente homogéneo, de color gris oscuro, de grano muy fino, sin fenocristales, con bajo grado de alteración. Algunos fragmentos presentan mineralización de calcita y feldespato en vesículas. Se observan finas fracturas. De acuerdo con el registro de perforación, a esta profundidad se atravesaba una roca ígnea de tipo hipabisal que varió de andesita a basalto.

Núcleo 3, 1810 a 1813 m. Roca densa de color gris verdoso, con fenocristales de minerales oscuros (¿hornblenda?), vetillas de clorita, vesículas rellenas de cuarzo y feldespato. Se observa mineralización secundaria de epidota, clorita, y puntos de pirita-calcopirita. En algunos fragmentos es notable el contenido de epidota bien cristalizada, que aparece en halos o textura de corona, rodeada de minerales ferromagnesianos.

Núcleo 4, 2000 a 2004 m. El registro de perforación indica que se trata de una andesita silicificada. Es una roca de color crema con manchas verdosas, con textura relicta de tipo porfídica con fenocristales de plagioclasas, trazas de clorita y puntos de pirita.

Núcleo 5, 2300 a 2303 m. Andesita de hornblenda de color gris verdoso. El registro de perforación indica un contacto entre andesitas y basaltos.

El núcleo 4 es un testigo del proceso de silicificación, por efecto de lixiviación por fluidos ácidos. Dada la secuencia litológica cortada durante la perforación de este pozo, el núcleo indica un trayecto lateral de los fluidos durante su ascenso, ya que los núcleos 3 y 5 muestran alteración hidrotermal por interacción con fluidos neutros o básicos. El ascenso lateral de volátiles ha generado una lixiviación total o parcial a distintas profundidades, como puede observarse en fragmentos de núcleos de los pozos H-10, H-19, H-23 y H-27. También debió ocurrir en otros pozos, de acuerdo a lo que se observa en las muestras de canal, aunque en ello no se obtuvieron núcleos.

## Conclusiones

La mineralogía hidrotermal es muy importante en un estudio petrológico, pues es un testigo de las condiciones del yacimiento geotérmico antes de la explotación del recurso. Los minerales o asociaciones de minerales hidrotermales pueden utilizarse como indicadores de parámetros físicos y químicos tales como la temperatura, permeabilidad, pH y composición del fluido.

En el yacimiento del CGLH la intensidad de la alteración hidrotermal es una indicación de la relación agua-roca que prevaleció en el yacimiento. En este yacimiento no existe una serie evolutiva de minerales termo indicadores, pero la epidota es el indicador de altas temperaturas ( $>180^{\circ}\text{C}$ ).

La secuencia litológica evidenciada por los cinco núcleos obtenidos en el pozo H-26 sugiere una trayectoria lateral de los fluidos que causaron lixiviación de la andesita a una profundidad aproximada de 2000 m. La andesita había sido alterada hidrotermalmente antes del proceso de lixiviación.

Esa trayectoria lateral se ha observado en núcleos de otros pozos, como en los de los pozos H-10, H-19 H-23 y H-27, donde se ha notado un proceso de disolución de minerales que deja masas porosas con cavidades rodeadas por halos de epidota y cuarzo.

El alto contenido de boro reportado en el lodo de circulación durante la perforación del pozo H-26, es otra indicación del ascenso lateral especies magmáticas.

En las partes someras del campo, la interacción de fluidos ácidos con las rocas se ha evidenciado por la alteración argílica, que indica la zona de descarga del fluido hidrotermal a la superficie. En cambio, en el subsuelo no se han identificado minerales que indiquen esa interacción, pero al menos el núcleo 4 del pozo H-26, cortado a 2000 m, ejemplifica un proceso de lixiviación que deja una masa porosa silicificada.

## Referencias

- Arellano G., V., A. García G., R.M. Barragán R., G. Izquierdo M., A. Aragón A., D. Nieva G., E. Portugal M., e I. Torres A., 1998. Desarrollo de un modelo básico actualizado del yacimiento geotérmico de Los Humeros, Pue. Informe interno IIE/11/11459/01/F. Inédito.
- Cathelineau, M. and G. Izquierdo, 1988. Temperature-composition relationships of authigenic micaceous minerals in the Los Azufres geothermal system. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 100, pp. 418-428.
- Cedillo R., F., 2000. Hydrogeologic model of the geothermal reservoirs from Los Humeros, Puebla, México. *Proc. World Geothermal Congress 2000*. Kyushu-Tohoku, Japan, pp. 1639-1644.
- Gutiérrez-Negrín, L.C.A., 1982. Litología y zoneamiento hidrotermal de los pozos H-1 y H-2 del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. CFE, Reporte interno 23-82. Inédito.
- Izquierdo, G., 1993. Difracción de rayos-X en la caracterización de especies arcillosas: un caso de aplicación en el pozo H29 del campo de Los Humeros, Pue. *Geofísica Internacional* 32 (2), pp. 21-329.
- Libreros R., P., 1991. Caracterización de filosilicatos en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue., por medio de difracción de rayos-X. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Puebla. Inédito.
- Reyes, A. 1990. Petrology of Philippine geothermal systems and the application of alteration mineralogy to their assessment. *J. Volcanol. and Geotherm. Res.*, 43, pp. 279-309.
- Viggiano, J.C., y J. Robles, 1988. Mineralogía hidrotermal en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue. I: Sus usos como indicadora de temperatura y del régimen hidrológico. *Geotermia*, 4 (1), pp. 15-28.