

Características mineralógicas y microtermométricas del yacimiento geotérmico de Los Humeros, Pue., México

Georgina Izquierdo, Víctor M. Arellano y Alfonso Aragón

Instituto de Investigaciones Eléctricas. Av. Reforma 113, Col. Palmira, Cuernavaca, Morelos, México, C.P. 62490. Correo: gim@iie.org.mx

Resumen

Durante las etapas de exploración y explotación del campo geotérmico de Los Humeros se han realizado diversos estudios cubriendo distintos tópicos. Desde el punto de vista geoquímico y mineralógico (mineralogía hidrotermal y microtermometría de inclusiones fluidas) se han reportado comportamientos diferentes a los observados en otros campos del mundo, los que en ocasiones han llevado a conclusiones imprecisas. La microtermometría de inclusiones fluidas ha mostrado fluidos poco salinos de alta temperatura, así como una ligera disminución de temperatura en la parte profunda la cual se asocia a un proceso de ebullición más que a un enfriamiento del sistema. En 1998 Arellano *et al.* realizaron un estudio multidisciplinario proponiendo la existencia de al menos dos reservorios. La información mineralógica de pozos perforados en la zona del Colapso Central fortalece esta propuesta. Sin embargo, para pozos localizados en la zona conocida como Corredor Mastaloya se tiene evidencia de lo que parece ser un solo yacimiento.

Palabras Clave: Los Humeros, microtermometría, mineralogía hidrotermal, reservorios.

Mineralogical and micro-thermometric features of the Los Humeros geothermal reservoir, Pue., Mexico

Abstract

Studies on many topics have been undertaken during the exploratory and exploitation stages of the development of Los Humeros geothermal field. From a geochemical and mineralogical view—including hydrothermal mineralogy and fluid-inclusion micro-thermometry, features have been reported differing from those observed in other geothermal fields. Sometimes this has led to ambiguous conclusions. Studies of fluid-inclusion micro-thermometry have shown low-salinity and high-temperature fluids, suggesting a slight temperature decrease in the deepest portion associated with a boiling process rather than a cooling process. In 1998, Arellano *et al.* performed a multi-disciplinary study and proposed the existence of at least two, distinct reservoirs at depth. Mineralogical data from wells drilled at the Colapso Central zone tend to support this idea. However wells drilled in the zone known as Corredor Mastaloya seemingly show evidence of a single reservoir.

Keywords: Los Humeros, micro-thermometry, hydrothermal mineralogy, reservoirs.

1. Introducción

profundos han migrado nuevamente modificando las características del fluido.

El 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 40 pozos a una profundidad mínima de 1500 m y máxima de 3100 m (pozo H-12). Actualmente la zona geotérmica se encuentra en plena etapa de explotación con 20 pozos productores y 3 inyectores integrados al sistema de suministro de vapor para alimentar a las ocho unidades turbo-generadoras a contrapresión de 5 MWe cada una instaladas en ese campo (Gutiérrez-Negrín, 2007). El CGLH es la tercera fuente generadora de energía geotérmica en la República Mexicana, después de los campos de Cerro Prieto y Los Azufres.

2. Geología del subsuelo

De acuerdo con Cedillo (1997), de la superficie al basamento se han identificado nueve unidades litológicas (Tabla 1), aunque por la morfología de la zona no todas están presentes en cada pozo. En la misma tabla se incluyen las unidades litológicas reconocidas inicialmente por Viggiano y Robles (1988). La hidrología de la zona se ve afectada debido a la irregular topografía del área hidrotermal, lo cual posiblemente se refleja en la recarga irregular del sistema mostrando distintas relaciones agua-roca.

Unidad litológica	Descripción	Unidad litológica	Descripción	Permeabilidad	Hidrogeología
I	Pómez, Basaltos y Andesitas	1	Pómez, Basaltos y Andesitas	Alta permeabilidad	Acuíferos superficiales fríos y calientes
		2	Tobas Líticas	Permeabilidad media	Posible acuífero
II	Ignimbritas Vítreas y Líticas	3	Ignimbritas Líticas y Vítreas	De baja a nula permeabilidad	Acuicludo
		4	Intercalación de Andesitas e Ignimbritas	Baja permeabilidad	Acuicludo
III	Andesitas de Augita en la parte superior.	5	Andesitas de Augita (AA)	Permeabilidad media	Yacimiento geotérmico superior
		6	Toba Vítreo Humeros	Baja permeabilidad	Acuitardo
	Andesitas de Hornblenda en la parte inferior. Hacia la base Tobas y Basaltos	7	Andesita de Hornblenda (AH)	Permeabilidad media	Yacimiento geotérmico inferior
		8	Basaltos	Permeabilidad media	Yacimiento geotérmico inferior
IV	Calizas, hornfels, intrusivos. Basamento local	9	Calizas, calizas metamorizadas, intrusivos	Baja permeabilidad	Acuitardo

Tabla 1. Geología del subsuelo de la zona de Los Humeros, Puebla (tomada de Cedillo, 1997).

3. Discusión

Como ya se mencionó, a partir de datos de producción inicial y de ingeniería de yacimientos, se planteó la ocurrencia de al menos dos yacimientos a profundidad en el CGLH, que estarían separados por una unidad de baja permeabilidad o bien por distintos regímenes de recarga. La Figura 2, tomada de Arellano *et al.* (1998), muestra un cambio en la pendiente, cerca de 900 msnm, el cual se interpretó como la barrera que separaba a los dos yacimientos. Así, se consideró que la unidad de AA, la más somera, producía líquido, vapor y posiblemente un fluido condensado, y que la unidad formada por AH, la más profunda, producía un fluido con baja saturación de líquido.

Los fluidos del yacimiento superior se han clasificado como de tipo bicarbonatado y los del yacimiento más profundo de tipo clorurado sódico (Barragán *et al.*, 1991; Arellano *et al.*, 1998). Los pozos perforados en el área del CC tienen un comportamiento diferente al de los que se localizan fuera de esta zona. Pozos en el CC producen fluidos de alta entalpía y mayor cantidad de vapor; además, en algunos pozos estos fluidos han producido corrosión en las tuberías provocando serios problemas. Mientras que pozos ubicados fuera del CC producen una mezcla de fluidos sin causar ningún efecto en las tuberías de producción.

Pozos perforados en el CC han atravesado grandes espesores de AA, pero de sólo 100 m a 170 m de AH y un espesor aun más reducido de la unidad identificada como toba vítrea. Por otro lado, pozos perforados fuera del CC cortaron la AA, la toba vítrea y un considerable espesor de AH. Esta observación puede considerarse opuesta al hecho de que los pozos con baja fracción de líquido producen de la AH y se encuentran localizados principalmente en la zona del CC, mientras que los pozos que producen mayor fracción de líquido producen de la AA, pero en ellos generalmente la AH presenta un mayor espesor.

Es muy probable que el factor más importante sea la zona en la que se han perforado los pozos, siendo menos relevante si han atravesado la AA o la AH o si han sido cementados o no, ya que el principal estrato productor depende de las características de recarga y temperatura. En la zona del CC se han reportado las mayores temperaturas, medidas y calculadas. Esto hace pensar que esta zona es la más cercana a la fuente de calor, la cual además de transmitir calor transfiere volátiles que ascienden a través de la AH y se mezclan con el fluido de la AA. Por otro lado, la zona del CC parece tener en general una mayor permeabilidad, sea primaria o secundaria, lo que favorece la movilidad de fluidos profundos.

Diferencias mineralógicas entre las dos unidades andesíticas

La inspección de fragmentos de núcleos y muestras de canal de pozos ubicados en la zona del CC reveló un bajo grado de alteración hidrotermal, siendo esto una indicación de la baja relación agua-roca o bien del poco tiempo de interacción. Para pozos de esta zona, el mayor porcentaje de alteración se reconoció en la unidad de AA, la cual ha sido considerada como la zona de producción de líquido dominante.

Algunos autores se han referido a la unidad de AH como la zona de un yacimiento ácido, debido a que algunos pozos perforados en esta zona mostraron efectos de corrosión en sus tuberías. Pero el estudio mineralógico demostró que no había minerales típicos de interacción de rocas con fluidos ácidos. Esta es una de las razones por las que se descartó la existencia de un yacimiento ácido previo a la explotación comercial del recurso geotérmico.

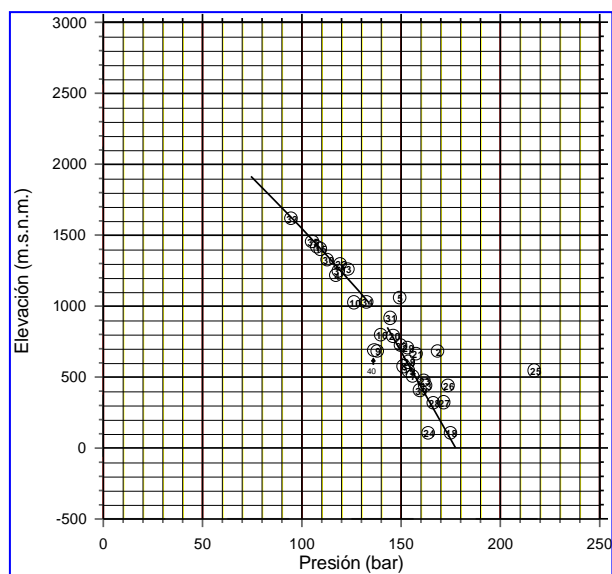


Fig. 2. Perfil unidimensional de presión no perturbada estimado con base en los registros de presión de pozos.

Los pozos que en algún momento han mostrado corrosión se encuentran localizados principalmente en la zona del CC, entre los que se cuentan: H-4, H-11, H-16 y H-29.

En general los principales minerales de alteración son: clorita, epidota, cuarzo, calcita, baja proporción de leucoxeno y pirita. Aparte de estos minerales, se han identificado arcilla, biotita y en menor proporción zeolitas, anhidrita, anfíbol, granate, diópsida y wollastonita. Estos minerales se forman en condiciones de pH de neutro a básico, de acuerdo con Reyes (1990).

El granate, la diópsida y la wollastonita se relacionan con el basamento granítico-granodiorítico o con la caliza metamorfizada, como en los pozos H-7, H-9, H-17, H- 28 y H-29.

Del archivo de datos petrográficos proporcionado por la CFE se tomó el porcentaje de algunos minerales de alteración hidrotermal, como la calcita y la epidota, que resultan ser los más indicativos. Su distribución se ha representado en varias secciones geológicas a lo largo de la columna litológica de cada pozo. Una de estas secciones se presenta en la Figura 3, que muestra la distribución de la calcita, y en la Figura 4, que presenta la distribución de la epidota. Esta sección incluye a los siguientes pozos perforados en la zona del CC: H-31, H-15, H-30, H-16, H-33, H-29, H-4 y H-10.

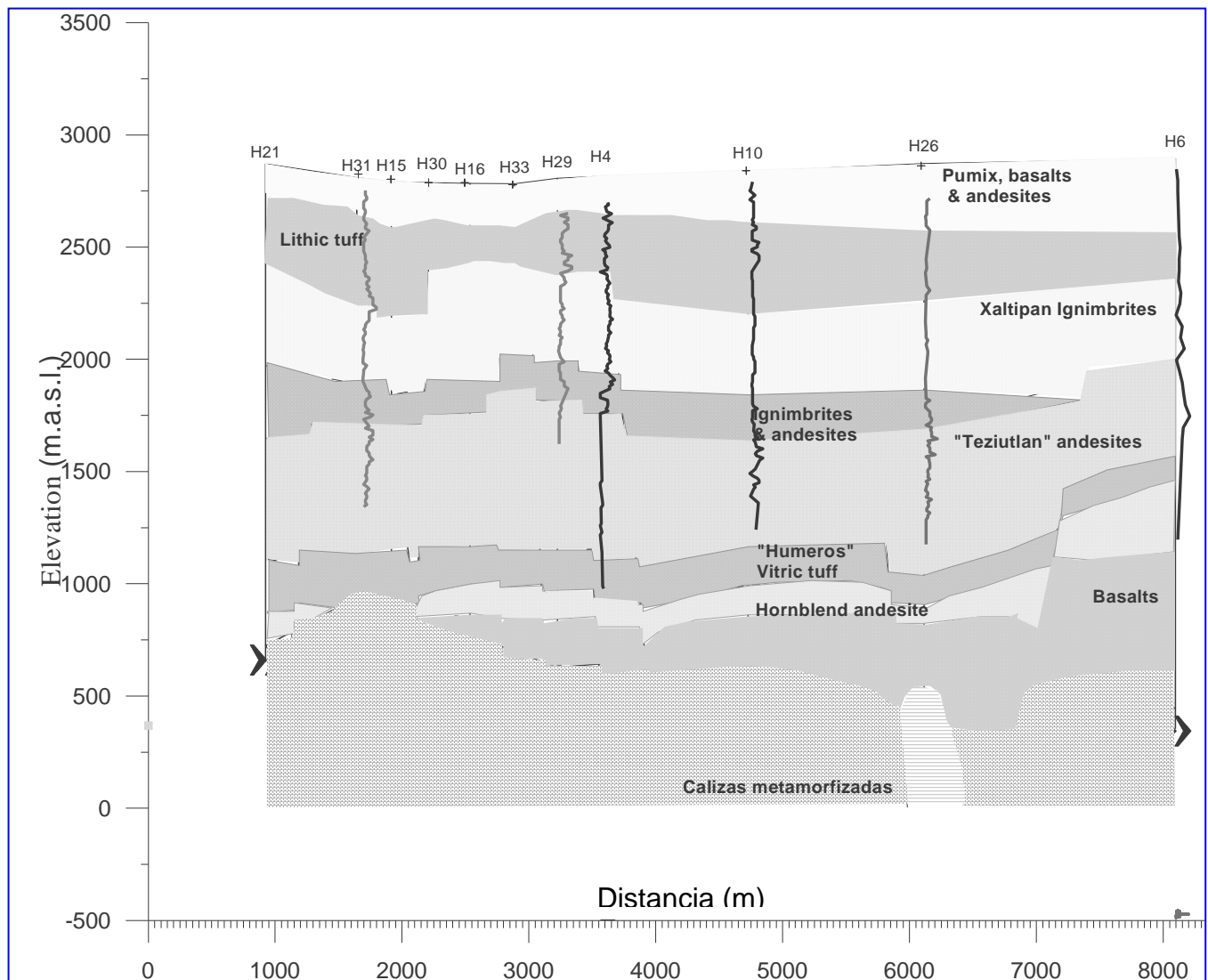


Fig. 3. Distribución de calcita a lo largo de la columna litológica de varios pozos

En la Figura 3 se observa que la calcita se distribuye a profundidades someras dentro de la unidad de AA. A mayor profundidad la calcita es escasa en pozos que producen una mezcla de fluidos y desaparece en pozos que producen mayor proporción de vapor. La ausencia de calcita a profundidad es el resultado de la baja relación agua-roca y no de la presencia de fluidos de bajo pH como alguna vez se consideró.

Algo parecido ocurre con la distribución de la epidota en la Figura 4. En pozos del CC la mayor proporción de epidota se observa en la andesita superior (AA) y hay menor proporción en la andesita profunda (AH), donde se esperarían mayor porcentaje de alteración. En otros pozos la epidota se distribuye en función de la temperatura y de la profundidad, tal y como lo hace en otros sistemas geotérmicos.

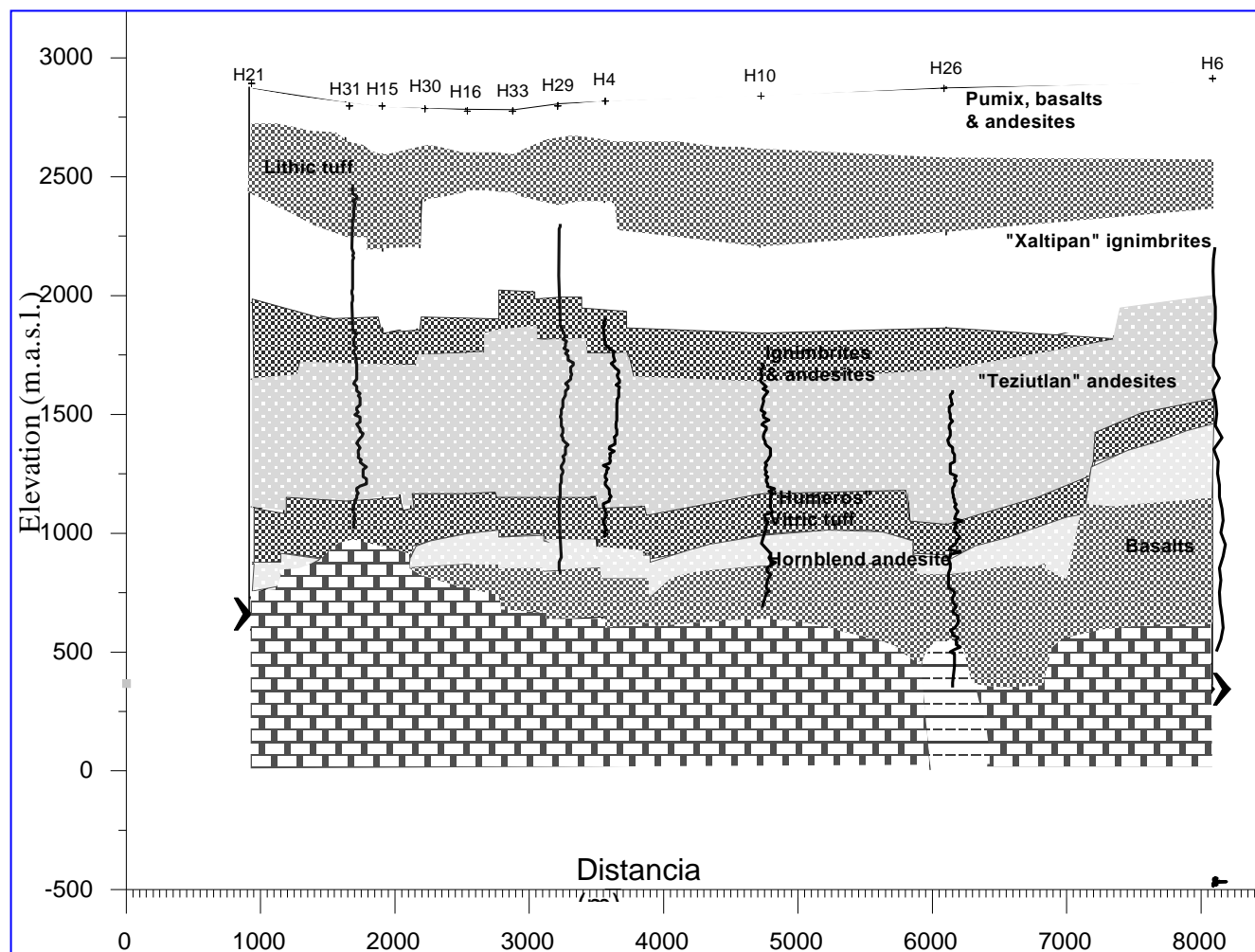


Fig. 4. Distribución de epidota a lo largo de la columna litológica de varios pozos

Características como relación agua-roca, temperatura y mineralogía de alteración hacen la diferencia entre las unidades AA y AH. Pozos como el H-12 y H-6, perforados en la parte sur del campo cerca del Xalapazco Maztaloya, son los más profundos del campo. El pozo H-6 cortó a la AA de 910 m a 1510 m, a la toba vítrea de 1570 m a 1670 m, a la AH de 1670 a 2470 m, y finalmente al basamento de caliza metamorfozada a partir de los 2470 m de profundidad. Por su parte, el pozo H-12 cortó la unidad de AA de 920 m a 1630 m, a la toba vítrea de 1630 a 1760 m, a la AH de 1760 m a 2490 m, a una riodacita de 2490 a 2680 m, a un basalto de 2680 m a 2730 m y al basamento granítico desde los 2730 m.

En la actualidad el pozo H-6 es el tercer pozo productor de líquido y el H-12 es el octavo. Los dos producen de las dos unidades andesíticas sin causar ningún problema en las tuberías. En contraste, el pozo H-4 se perforó a 1880 m. Cortó a la AA de 1060 m a 1860 m y a la toba vítrea de 1860 m a 1880 m. Este pozo se cerró antes de entrar a producción debido a que quedó fuera de control, a la acelerada corrosión de sus tuberías y a sus grandes emisiones de H₂S.

Otro ejemplo son los pozos H-16 y H-29, ambos ubicados en el CC y con un historial documentado debido a la presencia de fluidos agresivos que han ocasionado corrosión en sus respectivas tuberías. Actualmente el pozo H-29 es un pozo inyector y el pozo H-16 es un pozo productor.

El pozo H-29 se perforó a una profundidad total de 2200 m, atravesando la AA de 1020 m a 1750 m, la toba vítrea de 1750 m a 1890 m, la AH de 1890 a 1960 m y rocas basálticas de 1960 m a 2022 m.

Por su parte, el pozo H-16 cortó la unidad de AA de 910 m a 1670 m, la AH de 1800 m a 1950 m, el basalto de 1950 m a 2014 m y la caliza metamorfozada de 2014 m a su profundidad total (2048 m). El pozo no atravesó la unidad de toba vítrea. Al final de la década de los 80 este pozo presentó severos efectos de corrosión, y después de varios estudios se decidió cementarlo bloqueando la contribución de las porciones más profundas a la producción. Dado que desapareció la ocurrencia de fluidos agresivos y el pH del fluido aumentó, se concluyó que el “yacimiento ácido” había quedado aislado. Estudios químicos y de producción recientes en este pozo demuestran que el pH de sus fluidos ha venido disminuyendo con el tiempo (V.M. Arellano, comunicación personal). Esto puede considerarse como indicativo de la migración de fluidos magmáticos, ya que de acuerdo con la mineralogía no hay evidencia de la ocurrencia de un yacimiento ácido.

En resumen, el pozo H-4 no atravesó la AH, el pozo H-16 cortó 150 m de AH y el pozo H-29 únicamente 70 m de esta unidad. Por lo tanto, es evidente que para el pozo H-4 no existe tal yacimiento profundo, mientras que para los pozos H-16 y H-29 el espesor de dicho yacimiento sería mínimo.

Si bien ya se ha demostrado que la mineralogía no aporta ninguna evidencia de la ocurrencia de un yacimiento que mostrara interacción con fluidos ácidos, se confirma la cercanía de esos pozos (H-4, H-16 y H-29) a la fuente magmática y por tanto el ascenso de fluidos magmáticos posiblemente inducidos por la explotación; estos fluidos, en su ascenso e interacción con la fase líquida, se tornan corrosivos. El proceso en el caso del pozo H-4 puede ser, sin embargo, un tanto diferente, ya que antes de producir emitió grandes cantidades de H₂S, por lo que la corrosión de sus tuberías pudo deberse a varias especies, entre ellas HCl, H₂SO₄ y al mismo H₂S.

Algunas características del área del CC son: alta temperatura (con respecto a otras zonas del campo), baja relación de líquido, baja o ninguna recarga, vaporización de la fase líquida, e intenso fracturamiento de las rocas, lo que favorece la movilidad de fluidos profundos cargados de volátiles que han transformado la química de los fluidos.

Microtermometría de inclusiones fluidas

El estudio de inclusiones fluidas en el CGLH ha sido una tarea difícil, ya que los recortes de perforación de la mayoría de los pozos son muy pequeños, y en zonas profundas suele haber un bajo grado de alteración de las rocas por lo que la cantidad de minerales secundarios transparentes es muy limitada. Sin embargo, investigadores del Instituto de Investigaciones Eléctricas han realizados varios estudios que han aportado datos antes de la explotación del recurso (González e Izquierdo, 1996; Izquierdo, G., información no publicada).

La mayoría de las inclusiones estudiadas son del tipo líquido–vapor con varias proporciones de las dos fases, pero a profundidad se han reconocido inclusiones de una sola fase. Todas las inclusiones muestran un fluido acuoso de baja salinidad.

Pequeños fragmentos de calcita de estratos profundos muestran la presencia de inclusiones no acuosas. De su comportamiento en las etapas de calentamiento y enfriamiento a -150°C , se supone la presencia de CO_2 , metano y de otros hidrocarburos, indicando la movilidad de fluidos profundos.

En general, las temperaturas de homogeneización aumentan progresivamente con respecto a la profundidad. En la mayoría de muestras que provienen de la toba vítrea o de la AH hay un pequeño descenso de la temperatura de homogeneización. Este hecho ha sido considerado por otros autores como una inversión de temperatura, lo que junto con la ocurrencia de esmectita cálcica en muestras profundas se ha interpretado como un enfriamiento del sistema. Aunque las esmectitas se asocian a medios básicos de baja o mediana temperatura, ahora se sabe que una esmectita se puede estabilizar en un medio calcáreo, formando esmectita cálcica y resistir temperaturas hasta de 300°C (Izquierdo, 1993; Libreros, 1991). El descenso de la temperatura de homogeneización podría estar relacionado a un proceso de ebullición antes de la explotación del yacimiento. Métodos directos de medición de temperatura realizados por la CFE y temperaturas calculadas (Arellano *et al.*, 1998) han mostrado que el área más caliente del campo está dentro del Colapso Central. Por ejemplo, isotermas cercanas al pozo H-29 muestran 300°C a una profundidad de 1300 m, cuando la temperatura de homogeneización para el mismo pozo es de 342°C a 1500 m.

4. Conclusiones

Ni la ocurrencia de montmorillonita cálcica a profundidad ni el ligero descenso de temperatura de homogeneización (Th) en inclusiones fluidas de muestras profundas son evidencias de un enfriamiento del sistema geotérmico de Los Humeros. La disminución de Th en muestras profundas puede explicarse por el proceso de ebullición, lo cual se sugiere confirmar con un amplio estudio microtermométrico de inclusiones fluidas de muestras profundas.

A profundidad existen dos zonas relativamente diferenciadas en el área del CC, que han sido consideradas como dos yacimientos. En una, la fracción dominante es de líquido, y en la otra hay una mayor proporción de vapor (Arellano *et al.*, 1998, 1999). El tipo de fluido dominante en cada una explica por qué suele haber un bajo grado de alteración en las rocas profundas del CC, ya que el grado de alteración depende principalmente de la cantidad de agua con la que interactúa la roca: una reducida alteración en las rocas profundas de la zona del CC es indicativa de una baja relación agua-roca.

Desde el punto de vista mineralógico, la unidad formada por la toba vítrea, a la que se supone separando los dos supuestos yacimientos, no ha actuado propiamente como una capa sello, o como un acuitardo en términos hidrológicos, ya que el tipo y grado de alteración hidrotermal que presenta revelan que hay flujo e interacción con fluidos acuosos.

El análisis litológico de pozos perforados en el CC y que han mostrado efectos de fluidos agresivos, indican ausencia o espesores relativamente pequeños de la unidad de andesita de hornblenda (AH). Por lo tanto, la producción de esos pozos proviene principalmente de fluidos alojados en la andesita de augita (AA), con menor proporción de fluidos alojados en la AH, mezclados con fluidos magmáticos inducidos por la explotación.

No existen evidencias concluyentes de recarga profunda; sin embargo la migración de fluidos magmáticos profundos es evidente, por ejemplo por la presencia de boro.

La existencia de un yacimiento ácido en la andesita profunda, previo a la explotación, queda nuevamente descartada. El proceso más probable es que las especies ácidas provenientes de una fuente magmática profunda fluyan, inducidas por la explotación, en la fase vapor y en contacto con un fluido acuoso se conviertan en especies agresivas. Este proceso es evidente en pozos de la zona del CC.

Referencias

- Arellano, V.M., A. García, R.M. Barragán, G. Izquierdo, A. Aragón, D. Nieva, E. Portugal e I. Torres, 1998. Desarrollo de un modelo básico actualizado del yacimiento geotérmico de Los Humeros, Pue. Informe interno No. IIE/11/11459/01/F del Instituto de Investigaciones Eléctricas. Inédito.
- Arellano, V.M., A. García, R.M. Barragán, G. Izquierdo, A. Aragón y A. Pizano, 1999. Modelo conceptual del estado inicial del campo geotérmico de Los Humeros, Pue., México. *Geotermia*, Vol. 15, No. 2, pp. 111-120.
- Barragán, R.M, D. Nieva, E. Santoyo, M.P. Verma y M. López, 1991. Geoquímica de fluidos del campo geotérmico de Los Humeros (México). *Geotermia*, Vol. 7, No. 1, pp. 23-47.
- Cedillo R., F., 1997. Geología del subsuelo del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. Informe interno No. HU/RE/03/97 de la Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Residencia de Los Humeros. Inédito.
- González P., E., y G. Izquierdo M., 1996. Estudios petrográficos, inclusiones fluidas y difracción de rayos-X, para las muestras y ripios de barrena de los pozos H-38, H-39 y H-40 de Los Humeros, Pue. Informe interno s/n del Instituto de Investigaciones Eléctricas. Inédito.
- Gutiérrez Negrín, L.C.A., 2007. 1997-2006: A decade of geothermal power generation in Mexico. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 31, pp. 167-171.
- Izquierdo M., G., 1993. Difracción de rayos-X en la caracterización de especies arcillosas: un caso de aplicación en el pozo H-29 del campo de Los Humeros, Pue. *Geofísica Internacional*, Vol. 32, No. 2, pp. 321-329.
- Izquierdo, G., V.M. Arellano, A. Aragón, E. Portugal e I. Torres, 2000. Fluid acidity and hydrothermal alteration at the Los Humeros geothermal reservoir, Puebla, Mexico. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2000*, International Geothermal Association, Kyushu-Tohoku, Japan, May-June 2000, pp. 1301-1306.
- Libreros R., E.P., 1991. Caracterización de filosilicatos en el campo geotérmico de los Humeros, Pue., por medio de difracción de rayos-X. Tesis de Licenciatura, Escuela de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Puebla. Inédito.
- Reyes, A., 1990. Petrology of Philippine geothermal systems and the application of alteration mineralogy to their assessment. *J. of Vol. and Geoth. Res.* Vol. 43, pp. 279-309.
- Viggiano G., J.C., y J. Robles C., 1988. Mineralogía hidrotermal en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue. I: Sus usos como indicadora de temperatura y de régimen hidrológico. *Geotermia*, Vol. 4, No. 1. pp. 15-28.