

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.

1. Introducción

Desde las etapas de exploración y los inicios de producción del campo geotérmico de Los Humeros (CGLH) se han realizado innumerables estudios en diversas disciplinas, uno de los resultados de interés es el que respecta a la existencia de al menos dos yacimientos. Aunque esta propuesta ha sido sostenida por varios autores, también se ha considerado la existencia de un solo yacimiento. Teniendo en cuenta factores estructurales e hidrológicos, es muy probable que de acuerdo con la zona en que se localizan los pozos cualquiera de las dos propuestas sea correcta.

Uno de los trabajos que demuestra la existencia de al menos dos yacimientos en el estado inicial es el realizado por Arellano *et al.*, en 1998. Este, basado en una recopilación de información que incluyó datos geológicos, mineralógicos, geoquímicos y de producción, así como simulación de condiciones iniciales de producción; con el análisis e interpretación de datos se integró un modelo conceptual del CGLH.

Sobre la base de los datos analizados se desarrollaron modelos en una y dos dimensiones del yacimiento en su estado inicial (Arellano *et al.*, 1999). Se propone que el yacimiento más superficial se encuentra localizado entre 1600 y 1025 m.s.n.m. y es un yacimiento de líquido dominante con una temperatura entre 300 y 330° C. El segundo yacimiento se encuentra localizado debajo de los 850 msnm y se considera que es un yacimiento de baja saturación de líquido, para los pozos que se alimentan de esta zona se estimó una temperatura entre 300 y 400° C. En el mencionado estudio se comenta que el comportamiento de la distribución de presión, sugiere la presencia de una capa que separa los dos yacimientos, es muy probable que esta capa corresponda a la toba vítrea que en algunas zonas separa a la unidad de andesita de augita (AA) y la de andesita de hornblenda (AH). En el estado inicial esta capa pudo ser de muy baja permeabilidad; sin embargo los recortes de perforación presentan alteración hidrotermal indicando el flujo de fluidos que interactuaron con esta unidad.

Aunque esta barrera puede ser una unidad litológica diferente o bien una zona con distintos características geológicas o hidrológicas que limitan la recarga en algunas zonas del campo y que la muy escasa o nula recarga en esas zonas genera un comportamiento diferente. Este hecho explica porque en algunos pozos se tiene la evidencia de mezcla de fluidos aunque la toba vítrea esta ausente. En algunas zonas tiene un espesor de 100 m y en otra un máximo de 170 m.

Durante la etapa de explotación algunos pozos localizados en el Colapso Central (CC) mostraron acelerada corrosión de las tuberías. Inicialmente se pensó en la existencia de un yacimiento ácido hospedado en la andesita profunda. La existencia de tal yacimiento ha quedado descartada, ya que no se encontraron evidencias de fluidos ácidos antes de la explotación del yacimiento (Arellano *et al.*, 1998, Izquierdo *et al.*, 1999, 2000). De haber sido cierta la existencia de un yacimiento ácido la toba vítrea y la unidad de AH debieron mostrar reliquias de minerales que se forman en medio ácido. Para evitar la migración de fluidos ácidos del yacimiento profundo, la CFE decidió cementar algunos pozos del área del CC. Después de algún tiempo los componentes volátiles profundos han migrado nuevamente modificando las características del fluido.

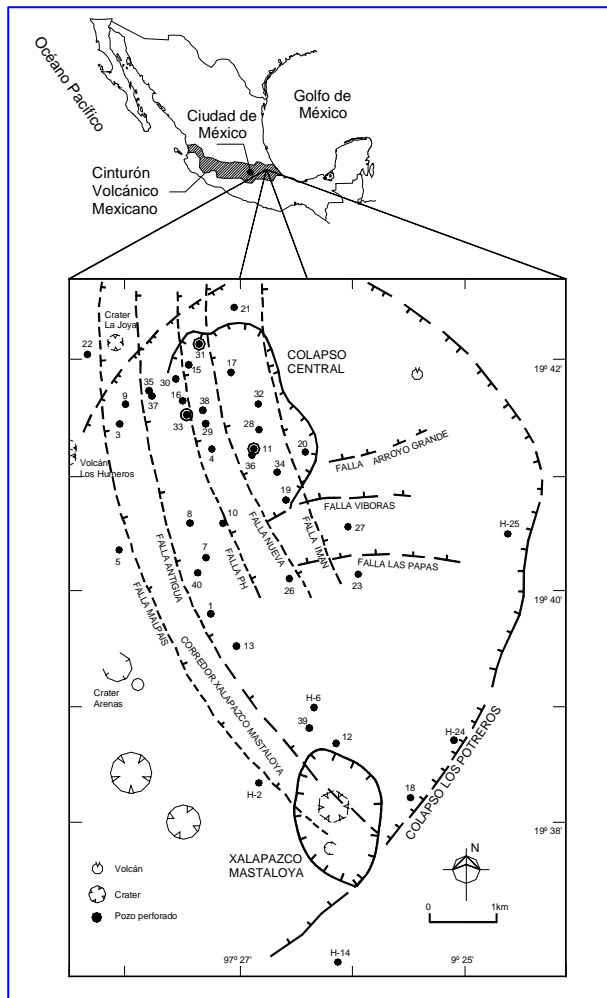


Fig. 1. Localización de Los Humeros

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 40 pozos a una profundidad mínima de 1500 m y máxima de 3100 m (pozo H-12). Actualmente, la zona geotérmica se encuentra en etapa de explotación; 20 pozos son productores, 3 son de reinyección y la diferencia o se encuentran cerrados o se utilizan de monitoreo. Se han instalado 7 plantas generadoras de 5 MWe cada una (Quijano y Torres, 1995); siendo así que el CGLH es la tercera fuente generadora de energía geotérmica en la República Mexicana.

2. Geología del subsuelo

De acuerdo con Cedillo (1997), de la superficie al basamento se han identificado 9 unidades litológicas (Tabla 1), por la morfología de la zona no todas están presentes en cada corte. En la misma tabla se incluye las unidades litológicas reconocidas inicialmente por Viggiano y Robles (1988a). 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
II	Ignimbritas Vítreas y Líticas	2	Tobas Líticas	Permeabilidad media	Posible acuífero
		3	Ignimbritas Líticas y Vítreas	De baja a nula permeabilidad	Acuicludo
		4	Intercalación de Andesitas e Ignimbritas	Baja permeabilidad	Acuicludo
		5	Andesitas de Augita	Permeabilidad media	Yacimiento geotérmico superior
III	Andesitas de Augita en la parte superior. Andesitas de Hornblenda en la parte inferior. Hacia la base Tobas y Basaltos	6	Toba Vítreo Humeros	Baja permeabilidad	Acuitardo
		7	Andesita de Hornblenda	Permeabilidad media	Yacimiento geotérmico inferior
		8	Basaltos	Permeabilidad media	Yacimiento geotérmico inferior
		9	Calizas, calizas metamorizadas Intrusivos	Baja permeabilidad	Acuitardo
IV	Calizas, hornfels, intrusivos. Basamento local				

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, quedó de manifiesto la ocurrencia de al menos dos yacimientos en el CGLH; los cuales se encuentran separados por una unidad de baja permeabilidad o bien por distintos regimenes de recarga. La Figura 2, tomada de Arellano *et al.* (1998), muestra un cambio en la pendiente, cerca de 900 m, el cual se ha interpretado como la barrera que separa dos yacimientos. Se ha considerado que la unidad de AA produce líquido, vapor y posiblemente un fluido condensado y que la unidad formada por AH produce un fluido con baja saturación de líquido.

Los fluidos del yacimiento superior se han clasificado como de tipo bicarbonatado y los fluidos del yacimiento más profundo son de tipo clorurado

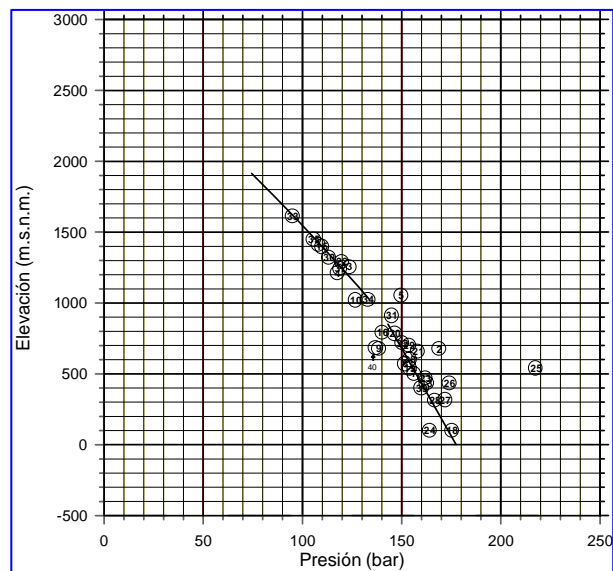


Fig. 2. Perfil unidimensional de presión no perturbada estimado con base en los registros de presión de pozos.

sódico (Barragán *et al.*, 1991; Arellano *et al.*, 2003). Los pozos perforados en el área del CC tienen un comportamiento diferente que 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 efectos en las tuberías de producción.

Pozos perforados en el CC han atravesado grandes espesores de AA, tan sólo de 100 m a 170 m de AH y un reducido espesor 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 como una contraposición en cuanto a que los pozos con baja fracción del líquido producen de la AH y se encuentran localizados principalmente en la zona del CC y que los pozos que producen mayor fracción de líquido producen de la AA y en la mayoría de pozos con esta característica la AH tiene mayor espesor.

Es muy probable que el factor importante es la zona en la que se han perforado los pozos, no es fundamental 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 el área 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 se caracteriza por mayor permeabilidad ya sea primaria o secundaria; lo que favorece movilidad de fluidos profundos.

Diferencias mineralógicas entre las dos unidades andesíticas

La inspección de fragmentos de núcleos y recortes de perforación de pozos ubicados en la zona del CC mostraron bajo grado de alteración hidrotermal; siendo esta una indicación de la baja relación agua-roca o bien 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 las tuberías.

El estudio mineralógico mostró la ausencia de minerales típicos de la interacción de las rocas con fluidos ácidos; este es uno de los motivos por los que se descarta la existencia de un yacimiento ácido previo a la explotación del recurso geotérmico.

Los pozos que en algún momento han mostrado corrosión se encuentran localizados principalmente en la zona del CC entre otros: 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 baja proporción zeolitas, anhidrita, anfíbol, granate, diópsida y wollastonita.

De acuerdo con Reyes (1990) las condiciones de pH a las que se forman los minerales antes mencionados son de neutro a básico.

Granate, diópsida y wollastonita se relacionan con el basamento granítico-granodiorítico o con la caliza metamorizada, 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 como calcita y epidota; los cuales 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 para calcita y en la Figura 4 para epidota. Esta sección incluye a los pozos H-31, H-15, H-30, H-16, H-33, H-29, H-4 y H-10 perforados en la zona del CC.

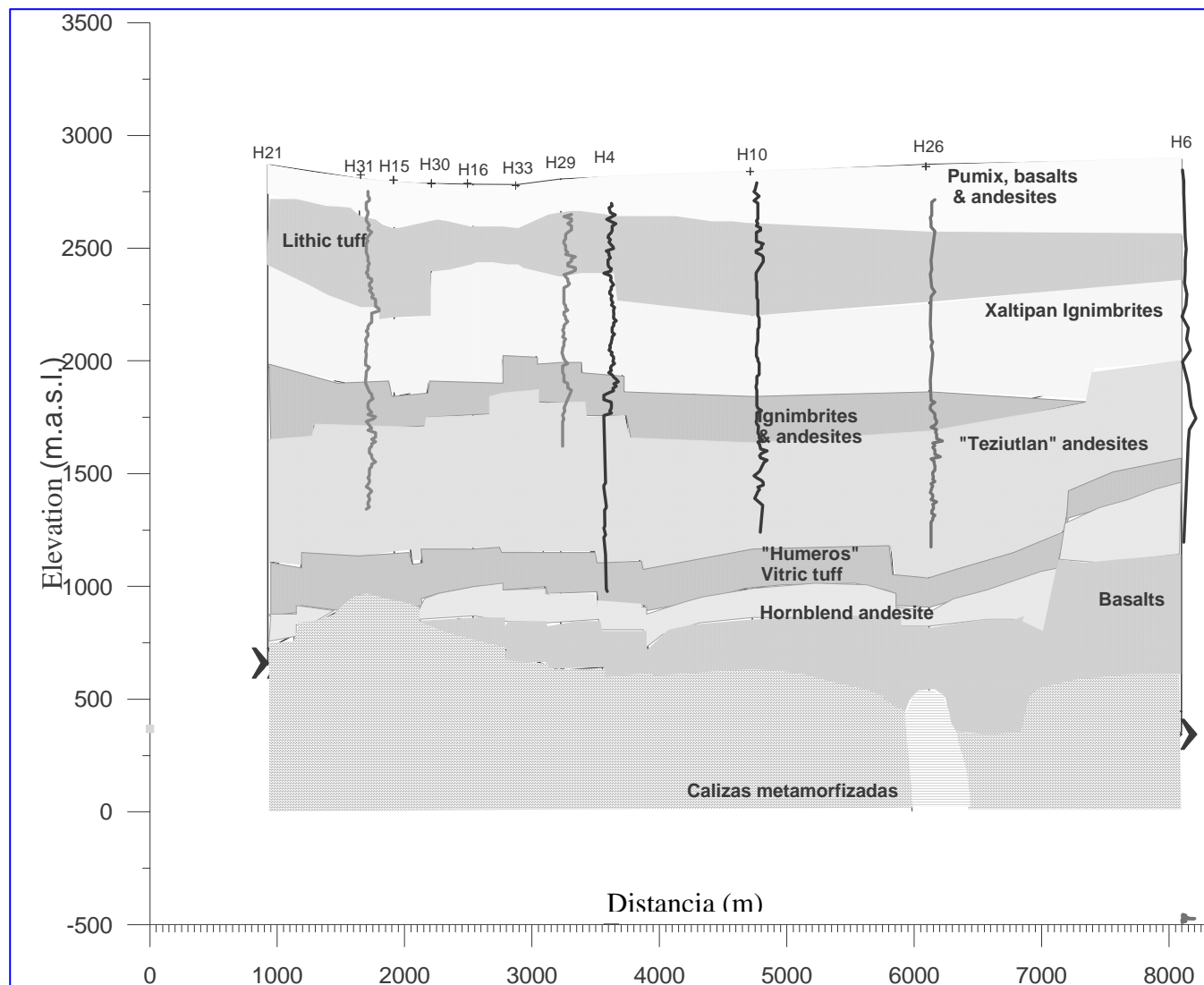


Fig. 3. Distribución de calcita a lo largo de la columna litológica de varios pozos

En la Figura 3 se observa que la calcita se distribuye de profundidades someras a la unidad de AA. A mayor profundidad la calcita es escasa en pozos que producen una mezcla de fluidos y a profundidad esta ausente 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 por la presencia de fluidos de bajo pH como alguna vez se consideró. Esta misma situación se observa en la Figura 4 para la epidota. En pozos del CC la mayor proporción de epidota se observa en la andesita superior y se

extiende en menor proporción a la andesita profunda (donde se esperaría mayor porcentaje de alteración). En otros pozos la epidota se distribuye en función de la temperatura y de la profundidad, tal y como se comporta en otros sistemas geotérmicos.

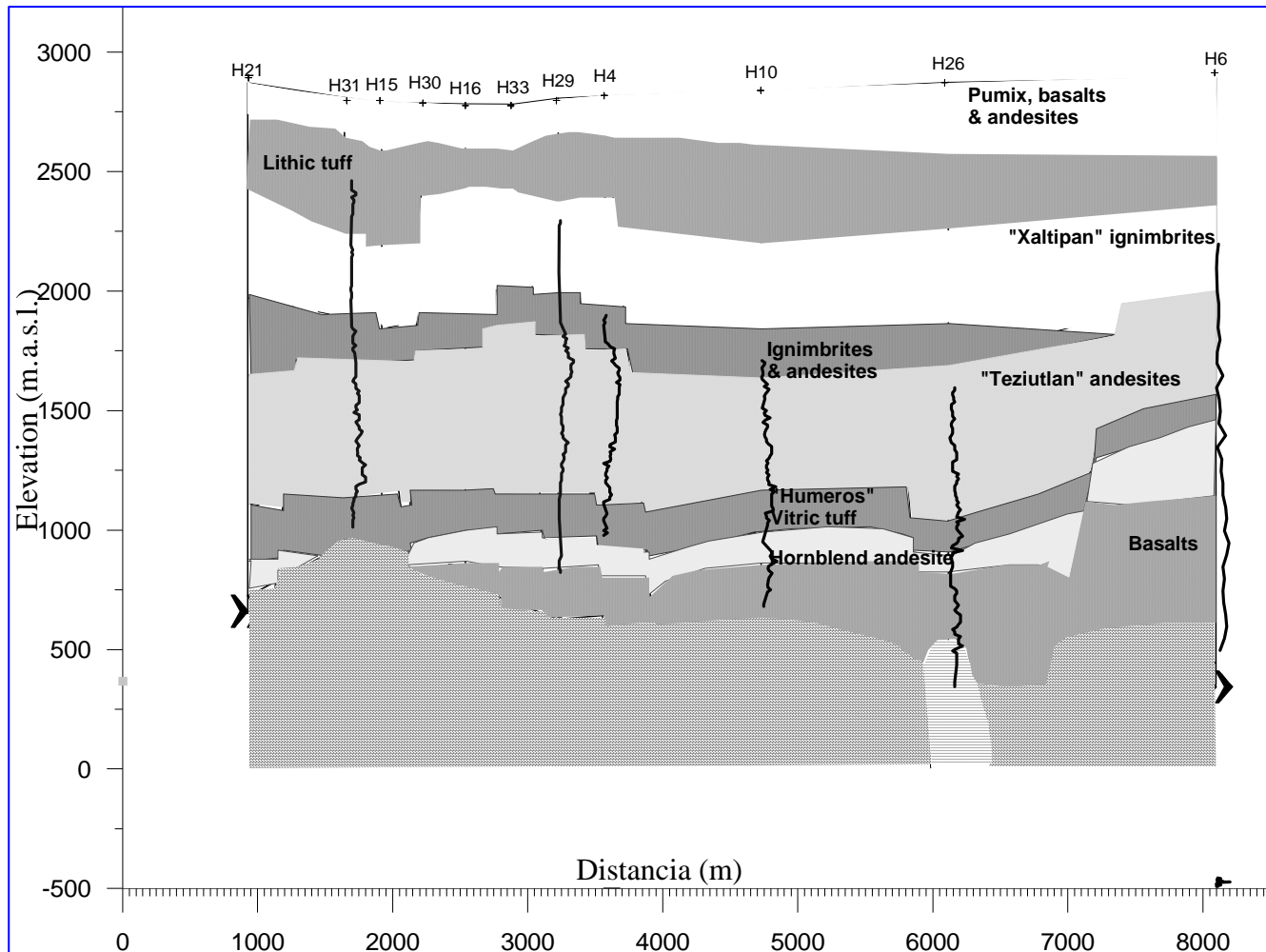


Fig. 4. Distribución de epidota a lo largo de la columna litológica de varios pozos

Características como relación agua-roca, temperatura y mineralogía de alteración hacen la diferencia entre las unidades formadas por AA y AH. Pozos como H-12 y H-6 perforados en la parte sur del campo cerca del Xalapazco son los más profundos del campo. El pozo H-6 cortó a la AA de 910 m a 1510 m, la toba vítrea de 1570 m a 1670 m, la AH de 1670 a 2470 M y finalmente la caliza metamorfozada de 2470 m a 2541 m.

El pozo H-12 cortó la unidad de AA de 920 m a 1630 m, la toba vítrea de 1630 a 1760, la AH de 1760 m a 2490 m, la riodacita de 2490 a 2680 m, basaltos de 2680 m a 2730 m y el granito de 2730 a 3104 m. En la actualidad el pozo H-6 es el tercer pozo productor de líquido y H-12 es el octavo. Los dos producen de las dos unidades andesíticas sin causar daño a las tuberías. En contraste el pozo H-4 se perforó a 1880 m. Cortó a la AA de 1060 m a 1860 m y 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 la tubería y a las grandes emisiones de H_2S .

Otro ejemplo son los pozos H-16 y H-29 los dos con un historial documentado debido a la presencia de fluidos agresivos que han causado corrosión. Los dos pozos se localizan en el CC. 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 de 2200 m, de 1020 m a 1750 m atravesó la AA, la toba vítrea de 1750 m a 1890 m, la AH de 1890 a 1960 m y la unidad de basalto de 1960 m a 2022 m.

Por otro lado, 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 metamorfizada de 2014 m a 2048 m. Al final de la década de los 80's este pozo mostró severos efectos de corrosión, después de varios estudios se decidió cementarlo bloqueando la contribución de estratos profundos a la producción. Dado que la ocurrencia de fluidos agresivos desapareció, el pH del fluido aumentó, se concluyó que el "yacimiento ácido" había quedado aislado. La interpretación reciente de datos químicos y de producción mostró que el pH del fluido geotérmico ha disminuido con el tiempo (V.M. Arellano, comunicación personal). Este hecho 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 atravesó únicamente 70 m de AH. Como se observa en un pozo como el H-4 no existe el yacimiento profundo, para los pozos H-16 y H-29 es mínimo el espesor de la unidad considerada como yacimiento profundo. Si bien ya se ha demostrado que la mineralogía no ha dado indicios de la ocurrencia de un yacimiento que mostrara interacción con fluidos ácidos; se confirma la cercanía de estos pozos a la fuente magmática y por tanto el ascenso de fluidos magmáticos posiblemente inducidos por la explotación y que en su ascenso e interacción con la fase líquida se tornan agresivos. La historia del pozo H-4 puede ser un tanto diferente ya que antes de producir hubo gran emisión de H_2S , por lo que la corrosión pudo deberse a varias especies entre ellas HCl , H_2SO_4 y al mismo H_2S .

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, intenso fracturamiento (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, en zonas profundas, bajo grado de alteración de las rocas por lo que la cantidad de minerales secundarios transparentes es muy limitada. Sin embargo varios 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; 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 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 muestran pequeño descenso de la temperatura de homogeneización. Este hecho ha sido considerado por otros autores como una inversión de temperatura y que junto con la ocurrencia, en muestras profundas, de esmectita cálcica 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 ser 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.*, 2003) han mostrado que el área mas caliente del campo esta dentro del Colapso Central. Por ejemplo isotermas cercanas al pozo H-29 muestran 300°C a una profundidad de 1300 m. la temperatura de homogeneización para el mismo pozo es de 342°C a 1500 m.

4. Conclusiones

Basándose en la ocurrencia de montmorillonita cálcica a profundidad y el ligero descenso de temperatura de homogeneización en muestras profundas se descarta el enfriamiento del sistema. La disminución de T_h en muestras profundas puede explicarse por el proceso de ebullición; el cual se sugiere confirmar con un amplio estudio microtermométrico de inclusiones fluidas de muestras profundas.

Existen dos zonas consideradas como dos yacimientos; bien diferenciadas en pozos del Colapso Central. Una en la que la fracción de líquido es dominante; la otra con mayor proporción de vapor (Arellano *et al.*, 1998, 1999). El porcentaje de la mineralogía de alteración depende principalmente de la cantidad de agua con la que interactúa la roca; la baja alteración en rocas profundas de la zona del CC es indicación de la baja relación agua-roca.

La unidad formada por la toba vítrea no ha actuado exactamente como una capa sello ya que el grado de alteración hidrotermal que presenta es una muestra de 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 de la unidad de andesita de hornblenda o espesores relativamente pequeños de esta. Así que la producción de estos pozos proviene principalmente de fluidos alojados en la andesita de augita y de fluidos de la andesita profunda 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. IIE/11/11459/01/F.
- 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, Revista Mexicana de Geoenergía*, Vol. 15, No. 2. pp. 111-120, Mayo-Agosto, 1999.
- 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, Rev. Mex. Geoenergía*. 7, 1, 23-47.
- Cedillo R., F. (1997) Geología del subsuelo del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. Informe HU/RE/03/97, Comisión Federal de Electricidad. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Residencia de Los Humeros, Puebla, 30 p. Inédito.
- González P., E., y G. Izquierdo M. (1996) Estudios petrográficos, inclusiones fluidas y difracción de rayos-X, para las muestras y ripios de la barrera de los pozos H-38, H-39 y H-40 de Los Humeros, Pue. Informe interno, Instituto de Investigaciones Eléctricas. Inédito.
- 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. *Geof. Int.* Vol. 32, No. 2, pp. 21-329.
- 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, México. *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, Rev. Mex. Geoenergía*, Vol. 4, No. 1. pp. 15-28.