

## DISTRIBUCIÓN Y CONDICIONES DE FORMACIÓN DE LOS MINERALES DE ARCILLA EN UN CAMPO GEOTÉRMICO—EL CASO DE LOS HUMEROS, ESTADO DE PUEBLA

Eduardo González-Partida\*,  
Rosa María Barragán-Reyes\* y  
Rosario Vázquez-Escobedo

### RESUMEN

El estudio mineralógico por difracción de rayos X de diversas muestras de pozo del campo geotérmico de Los Humeros ha mostrado una distribución zonal de los minerales del grupo de la arcilla: las asociaciones más hidratadas y ricas en Na están presentes cerca de la superficie; las asociaciones poco hidratadas y ricas en Ca y, o en vez de él, en K, aparecen a profundidad media; y las menos hidratadas o anhidras y ricas en Mg, en las zonas más profundas.

Se ha podido relacionar la abundancia relativa de cada mineral del grupo de la arcilla con las características litológicas de la roca huésped y la temperatura específica de formación de cada mineral. Así, en rocas ácidas, donde prevalecen temperaturas menores que 150°C, se favorece la formación de caolinita; en rocas andesíticas o basálticas y temperaturas alrededor de 200°C, se produce montmorilonita cálcica; en rocas ácidas e intermedias que contienen K de manera abundante, se forma illita, pero si existe Mg suficiente y el pH es más básico, resultan minerales del grupo de la clorita.

Se determinó la presencia de caolinita en la parte profunda de los pozos, a temperaturas de alrededor de 300°C, lo que aparentemente representaría una inversión térmica del sistema, pero este fenómeno se puede explicar como consecuencia del pH y de la composición química de la roca huésped.

Palabras clave: geoquímica, geotermia, distribución de arcillas, Los Humeros, Puebla, México.

### ABSTRACT

A mineralogical study using X-ray diffraction on samples from Los Humeros geothermal wells showed that the clay minerals follow a zonal distribution: the most hydrated and Na-rich associations were found near the surface, less hydrated and Ca- or K-rich associations were found at an intermediate depth, and the least hydrated or anhydrous and Mg rich associations were found at deeper levels of the reservoir.

A relationship between the relative abundance of each clay mineral and the specific lithology of unaltered rocks and the temperature of the formation was established. The observed pattern of behavior is as follows: for acid rocks and  $t < 150^{\circ}\text{C}$ , the kaolinite production seemed to occur; for andesitic or basaltic rocks and at a temperature of around  $200^{\circ}\text{C}$ , Ca-montmorillonite could occur; for intermediate and acid rocks with abundance of K, illite can be formed, but if Mg abundance is enough and the pH is basic then chlorite is formed.

It was concluded that the kaolinite occurrence at deeper zones of the reservoir and at a temperature of around  $300^{\circ}\text{C}$  (which has been interpreted as a thermal inversion of the system) could be explained as a consequence of the pH of the fluid and the chemical composition of unaltered rocks.

Key words: geochemistry, geothermy, clay distribution, Los Humeros, Puebla, Mexico.

### INTRODUCCIÓN

En un sistema geotérmico, la reacción de las rocas del yacimiento con el fluido ascendente origina un proceso de alteración hidrotermal; esto es, se produce un cambio de minerales primarios a minerales de neoformación, bajo condiciones de temperatura y presión más estables, adquiriendo a su vez una distribución gradual o de halo térmico. Estos productos (como es el caso de los minerales arcillosos) son un reflejo de las condiciones físico-químicas presentes en la zona con anomalía térmica.

Los factores que determinan la identidad, abundancia y estabilidad de los minerales autigénicos, producto de la acción recíproca entre el fluido geotérmico y la roca, actúan íntimamente y, por lo general, uno o dos dominan sobre los demás. Estos

factores son: temperatura, permeabilidad, mineralogía de la roca primaria, composición del fluido geotérmico, presión total y tiempo (duración de la actividad), principalmente.

Los factores mencionados condicionan la presencia de asociaciones minerales características en un determinado espacio del yacimiento (Elders, 1977; Steiner, 1977; Browne, 1978, 1984). Algunas metodologías de investigación consideran a la temperatura como el parámetro más importante. En efecto, la temperatura es uno de los factores de mayor importancia en la formación de los minerales autigénicos en sistemas geotérmicos activos. Los intervalos de temperatura en el subsuelo pueden ser identificados mediante la presencia de ciertos minerales altamente sensibles a los cambios de ésta, como aquéllos que contienen en su estructura  $\text{OH}^-$ . Tal es el caso de los minerales arcillosos y algunos otros, como zeolitas, anfíboles y epidotas.

En la actualidad, el estudio termomicroscópico de las inclusiones fluidas proporciona información acerca de la temperatura

\*Instituto de Investigaciones Eléctricas, Departamento de Geotermia, Apartado Postal 475, Cuernavaca, 62000 Morelos.

de formación del mineral de una manera precisa; sin embargo, en un campo geotérmico se tiene la posibilidad de efectuar mediciones directas de temperatura o por medio de geotermómetros geoquímicos e isotópicos.

La permeabilidad controla de manera directa el volumen de agua que pasa por las rocas y, por tanto, es un factor importante en la formación de los minerales hidrotermales, en vista de que los cambios mineralógicos en muchos sitios no son isoquímicos (Browne y Ellis, 1970). Las características favorables del campo geotérmico de Los Humeros están definidas por una serie de fallas y fracturas, que favorecen la existencia de zonas de permeabilidad secundaria alta, indispensables durante el ascenso del fluido.

La naturaleza de la roca encajonante y el proceso de alteración fijan las características de los minerales que se forman y la composición química de la salmuera; además, influyen y controlan la permeabilidad primaria por la textura, porosidad, estructura y tamaño de los minerales.

Cada ambiente condiciona la formación de un determinado tipo de arcilla: En general, en el granito predomina la formación de caolinita e illita; tanto en el basalto como en la andesita es común la formación de montmorilonita, illita y vermiculita; en las cenizas volcánicas se forma montmorilonita.

Otro factor que influye sobre la roca para la formación de arcillas es la estabilidad de los minerales. Generalmente, los minerales reaccionan con el ambiente que los rodea. En su mayoría son estables en las condiciones en que se crearon, pero se hacen inestables si cambia este ambiente. La mayor parte de los formados bajo condiciones de temperatura y presión altas se hace inestable bajo condiciones atmosféricas y, al contrario, muchos de los formados cerca de la superficie pasan a adquirir formas más estables a presión y temperatura elevadas. En la arcilla, la estabilidad depende, en gran parte, de su estructura y composición química.

La composición del fluido, especialmente su pH, tiene una gran influencia en la mineralogía autigénica de cualquier campo geotérmico. Toda la mineralogía secundaria refleja la composición y la evolución espacial del fluido, siempre y cuando el fluido y los minerales autigénicos estén en equilibrio. De este modo, la relación paragénesis-fluido hidrotermal puede ser analizada a través de diagramas de estabilidad, los cuales dan una información considerable acerca de las condiciones físicoquímicas del fluido a distintos niveles de profundidad y, en consecuencia, a distintas temperaturas en función de las paragénesis encontradas.

La presión del fluido hidrotermal en las áreas geotérmicas de líquido dominante es baja y, por lo general, nunca excede los 200 bares. En ellas, la presión hidrostática es casi igual o ligeramente inferior a la presión del fluido, mientras que en los campos de vapor dominante, la presión del fluido está por debajo de la presión hidrostática (Browne, 1984). El efecto principal de la presión en un sistema hidrotermal es controlar la profundidad y temperatura a la cual la ebullición ocurre.

El tiempo de formación de los minerales arcillosos está sujeto a la composición y estructura de la roca madre y al ambiente de los minerales que los rodea.

El fluido geotérmico, al actuar sobre minerales primarios en un medio sin permeabilidad, da lugar a la formación de minerales de metamorfismo de contacto (conducción térmica), mientras que en áreas o puntos donde hay permeabilidad, la convección del fluido produce una mineralogía hidrotermal. La permeabilidad puede producirse por fracturamiento y por lixiviación. En este último proceso, se disuelven sustancias solubles de la roca con

el aumento de temperatura (Na, Cl, Ca), sin que ocurra de manera simultánea un proceso de alteración hidrotermal.

La ebullición es un mecanismo que origina cambios en la composición química del fluido, los cuales se reflejan a través de la secuencia de depósito. El fenómeno de ebullición se presenta cuando disminuye la presión o temperatura en una zona con actividad hidrotermal y da lugar a la liberación de vapor y gas de la fase líquida.

#### UBICACIÓN DE LOS POZOS

Para llevar a cabo el estudio presente, fueron utilizadas muestras provenientes de los pozos H-16 y H-17, que están situados en el extremo septentrional de la zona de colapso central dentro de la caldera de Los Humeros (Figura 1).

El pozo H-16 tiene una profundidad de 2,010 m y el H-17 una de 2,210 m, siendo ambos de tipo productor.

Geológicamente, ambos pozos están ubicados en el límite septentrional de las manifestaciones termales presentes en el área, que fueron originadas por los sistemas de fallas de dirección NW-SE y N-S. En estas direcciones de fallamiento están incluidas

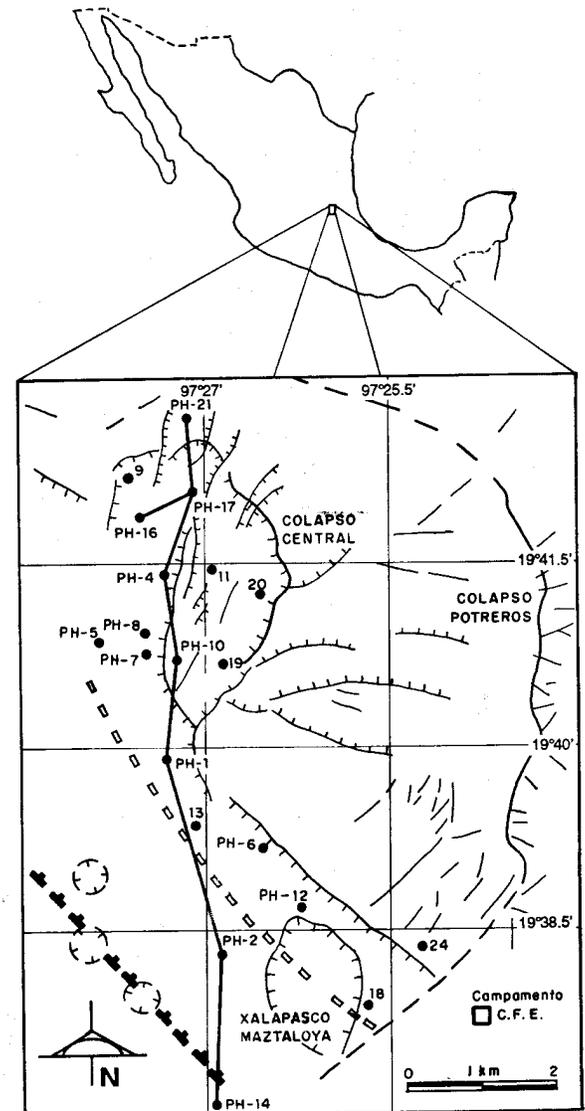


Figura 1.- Mapa estructural de la caldera de Los Humeros, Estado de Puebla, y de localización de los pozos referidos.

las fallas Humeros-Maztloya y Los Conejos, las cuales son importantes en el control geotérmico del área. Además, los pozos H-16 y H-17 están presentes cerca del fracturamiento propio de la evolución de la caldera, representado por las fallas concéntricas La Cuesta, Las Habas, El Arenal y Pedernal.

Para la elaboración de secciones y correlación del subsuelo fueron considerados otros pozos, algunos de ellos previamente estudiados por Prol-Ledesma (1990), siendo éstos: H-21, H-4, H-1, H-2, H-14 y H-17; así como datos de análisis geoquímicos de los pozos H-8, H-9, H-11, H-15, H-16 y H-20, que sirvieron para la construcción de los diagramas geoquímicos.

MÉTODOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En las columnas litológicas de las Figuras 2 y 3 se muestra la petrología primaria de los pozos H-16 y H-17, dada por Viggiano-Guerra y Robles-Camacho (1988).

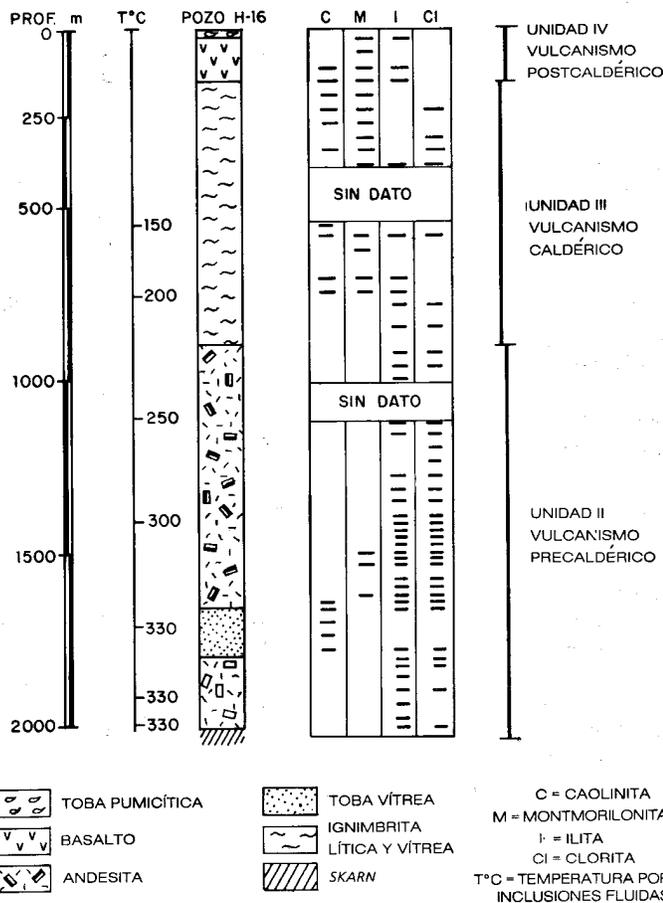


Figura 2.- Columna litológica y contenido de arcillas del pozo H-16.

Por otro lado y en forma de columna, se marca la mineralización de arcillas en relación con su correspondiente unidad litológica. Asimismo, se incluye la relación de la unidad con el ciclo volcánico de la caldera, establecido por Gutiérrez-Negrín (1987). La estimación de temperatura corresponde a la efectuada por determinaciones termomicrométricas de los pozos analizados (González-Partida *et al.*, 1991).

PARAGÉNESIS DE LOS MINERALES ARCILLOSOS

La mineralogía de arcillas en el campo geotérmico de Los Humeros ha permitido determinar cuatro zonas, con intervalos de

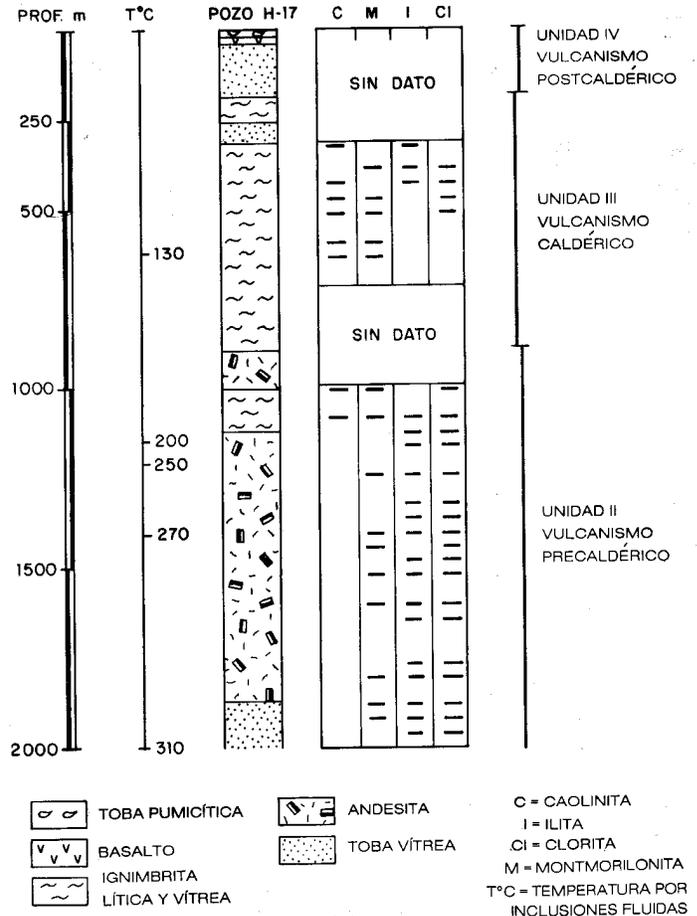


Figura 3.- Columna litológica y contenido de arcillas del pozo H-17.

temperatura que varían de 140 a 220°C (Prol-Ledesma, 1990) (Figura 4, sección A-A', que incluye los pozos H-21, H-4, H-10, H-1, H-2, H-14, y H-17). Estas zonas son las siguientes:

1. Zona de montmorilonita.
2. Zona de interestratificados de ilita-montmorilonita.
3. Zona de ilita-clorita.
4. Zona de ilita-clorita y montmorilonita.

La sección B-B' de la Figura 4 incluye, por otro lado, las zonas definidas a partir de datos de los pozos H-16 y H-17, en muestras analizadas durante el presente estudio.

La caolinita fue identificada en las muestras someras de los pozos H-21, H-10, H-1, H-2 y H-14. Para el caso particular del pozo H-17, se dispuso de muestras para análisis a partir de los 330 m, y cuya presencia continuó hasta los 710 m, aunque en menor cantidad (Figura 4). El pozo H-16 (Figura 4, sección B-B') reporta una distribución un poco más amplia, y esto es evidente por su contenido a mayor profundidad.

En ambos pozos (H-16 y H-17; Figura 4, sección B-B'), la presencia de la caolinita queda contenida principalmente en el paquete ignimbrítico de la unidad III, con una temperatura inferior a los 200°C; además, en el pozo H-16 también está presente entre los 1,650-1,720 m, con una temperatura, determinada por inclusiones fluidas (González-Partida *et al.*, 1991), de 330°C (sección B-B'). En este caso, el hecho de tener caolinita a tal profundidad se explica más adelante, pero en principio su aparición parece estar influenciada por la litología inicial.

La montmorilonita está presente en dos zonas (Figura 4) a una profundidad inferior a 1,000 m, excepto en el pozo H-14, donde se le encuentra entre los 1,500 y 2,000 m, aproximada-

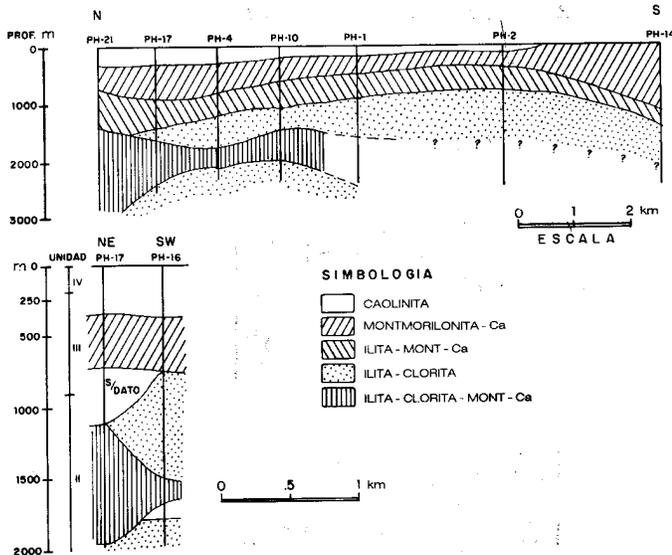


Figura 4.- Secciones de distribución de arcillas en el campo geotérmico de Los Humeros.

mente (Prol-Ledesma, 1990), bajo la zona de ilita-clorita. Específicamente, en el pozo H-17 aparece montmorilonita entre 330-710 m de profundidad; cabe mencionar que en dicho pozo la montmorilonita se encuentra acompañada de caolinita. La segunda zona se sitúa entre 1,100 y 1,970 m, junto con ilita y clorita.

En el pozo H-16, la montmorilonita va de 0 a 750 m, también junto con caolinita, y la segunda zona se limita sólo de 1,500-1,650 m; es común encontrarla en gran parte de la columna de ambos pozos con ilita y clorita. La presencia de la montmorilonita queda relacionada en el pozo H-16 con rocas basálticas de la unidad IV y parte superior de la unidad III y con rocas andesíticas de la unidad II; mientras que en el pozo H-17 predomina en la unidad II de andesitas.

La zona de montmorilonita de menor profundidad corresponde a una temperatura aproximada a los 130°C y la zona más profunda a una temperatura que varía de 200 a 300°C. El tipo de montmorilonita dominante es el cálcico en rocas basálticas de la unidad IV del pozo H-16.

Para el pozo H-17, aunque la ilita se encuentra desde los 330 m, su abundancia es mayor en el intervalo 1,100-1,970 m (Figura 4, sección B-B'), que corresponde a rocas andesíticas de la unidad II; en menor grado, está presente en ignimbritas de la parte superior de la unidad III. En el pozo H-16 la presencia de ilita es prácticamente constante a lo largo de toda la columna, aunque predomina también en rocas andesíticas de la unidad II y su presencia en la unidad III es esporádica. La temperatura registrada es de 250-300°C.

La clorita es abundante en las partes más profundas del reservorio, como lo demuestran las columnas de los pozos H-16 y H-17 (Figura 4, sección B-B'). Las muestras menos profundas contienen una cantidad pequeña de clorita, pero ésta comienza a ser más abundante a partir de los 1,000 m, estando en relación con la presencia de rocas andesíticas de la unidad II. Su presencia indica un intervalo de temperatura de 250-330°C (González-Partida *et al.*, 1991). La distribución de la clorita permite deducir en las partes más someras la dirección de ascenso de los fluidos geotérmicos hacia la superficie (Cathelineau y Nieva-Gómez, 1985).

Resumiendo, la presencia de caolinita se limita a zonas donde la roca primaria es de composición ácida (ignimbrita presente en los pozos H-16 y H-17), generalmente a profundidades

someras, cuya temperatura es menor que 150°C. Comúnmente, la montmorilonita se presenta en rocas de composición intermedia (andesita, aporte de Mg y Ca). Probablemente se produjo transformación de caolinita a esmectita, por ganancia de Mg y Ca favorecida por el aumento de temperatura y la presencia de un medio dominante intermedio. Las temperaturas más frecuentes son aproximadamente de 200°C. La ilita está presente en rocas tanto de composición ácida como intermedia, pero su abundancia depende esencialmente del contenido de K en la roca y la temperatura del medio. Finalmente, la clorita se ve favorecida con el aumento de temperatura del medio, así como con una composición más básica de la roca.

#### DIAGRAMAS DE ESTABILIDAD PARA LAS ARCILLAS Y DISCUSIÓN

Las asociaciones mineralógicas en un campo geotérmico sugieren una evolución espacial del fluido hidrotermal. Como se mencionó antes, al reaccionar el fluido y la roca encajonante, ambos cambian su composición original, siendo la diferenciación más grande mientras más tiempo dure la reacción, provocando así una evolución temporal del fluido hidrotermal.

Los diagramas de estabilidad permiten conocer los campos de estabilidad de las distintas especies minerales y se puede detectar bajo qué condiciones termodinámicas el líquido y los minerales están en equilibrio y permiten conocer y comprender también el por qué existe igual mineralogía a distintos niveles y posiciones del campo. Con este sentido, los diagramas de estabilidad fueron hechos en términos de la actividad ( $\alpha$ ) de los elementos  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Na^+$ ,  $H^+$ ,  $Al^{+++}$ , en presencia de agua y considerando una saturación en  $SiO_2$ .

La concentración o la actividad de sustancias puras no varían a menos que sean agregadas impurezas. Así, para el agua pura, magnetita pura, etc., se tiene una actividad  $\alpha = 1.0$ .

Se utiliza, también, los diagramas logarítmicos de concentración respecto al pH para indicar las concentraciones específicas de los iones en cuestión para un sistema dado.

Como se mencionó anteriormente, la naturaleza de la roca encajonante y la composición del fluido, sobre todo el pH, tienen una gran influencia en la mineralogía autigénica. Prueba de ello es la aparición de distintas asociaciones de minerales arcillosos en los pozos H-16 y H-17, donde estos dos factores dominan sobre la temperatura. En efecto, el pozo H-16 se alimentaba en su parte profunda con un fluido ácido, cuya agresividad provocó la corrosión de la tubería a los 1,667 m (Nieva-Gómez *et al.*, 1989), produciendo a esta profundidad un incremento en la abundancia de caolinita, así como la segunda zona de montmorilonita para el pozo H-17.

Para los que se dedican a la investigación de geotermómetros basados en arcillas hidrotermales, este hecho indicaría una inversión térmica en el sistema hidrotermal, tal como lo ha consignado Prol-Ledesma (1990); sin embargo, los geotermómetros químicos indicaron 295°C en el fondo del pozo y 300°C por medio del estudio de inclusiones fluidas en cuarzo y epidota (Barragán-Reyes *et al.*, 1989), lo que conduce a pensar que para el campo de Los Humeros, más que la temperatura, es la composición química de la roca y el pH del fluido los que determinan la presencia de los distintos tipos de arcilla. Con el fin de investigar la relación fluido-roca, se realizó el análisis geoquímico de varios pozos (H-8, H-9, H-11, H-15, H-16 y H-20).

Los resultados fueron calculados a partir de una salmuera recolectada a boca de pozo (composición química de la salmuera en la superficie), donde se tomó muestra tanto de una fase líquida como de una de vapor. De esta salmuera se determinó, por medio

de un programa de cálculo denominado EQQYAC (Barragán-Reyes y Nieva-Gómez, 1989), la temperatura a fondo de pozo, el pH y la actividad de las especies principales presentes en las fases líquida y de vapor. Los valores están consignados en la Tabla 1.

Los resultados anteriores permiten determinar una temperatura del reservorio que va de 290 a 300 °C y un pH que varía de básico a ácido, según el pozo considerado. Los datos térmicos por geotermometría geoquímica coinciden con los deducidos de inclusiones fluidas y por otros geotermómetros minerales (González-Partida, en prensa).

Por otro lado, se hizo el cálculo de las actividades de H<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup> y Na<sup>+</sup> de los diagramas de estabilidad derivados experimentalmente de los sistemas CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-HCl (Figura 5) y K<sub>2</sub>O-Na<sub>2</sub>O-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-HCl-H<sub>2</sub>O (Figuras 6 y 7). En el primer caso, el sistema incluye minerales de calcio y potasio, en términos de relaciones entre actividades iónicas; en el segundo, incluye minerales de potasio y sodio. En los tres casos, el intervalo de temperatura fue de 250 a 300 °C y se consideró un fluido saturado en sílice, con presencia de HCl y H<sub>2</sub>O.

La Figura 5 muestra un diagrama log (αK<sup>+</sup> / αH<sup>+</sup>) vs. log (αCa<sup>++</sup> / α[H<sup>+</sup>]<sup>2</sup>), en el cual se ha representado la salmuera de los distintos pozos geotérmicos a una temperatura de 300 °C.

Por el contrario, la Figura 6 muestra las relaciones log (αNa<sup>+</sup> / αH<sup>+</sup>) vs. log (αK<sup>+</sup> / αH<sup>+</sup>). Como se puede observar, en el caso en que se considera al Ca<sup>++</sup>, se inhibe la formación de caolinita, formándose montmorilonita cálcica y leonhardita (zeolita cálcica deshidratada); esto podría corresponder a fluidos geotérmicos que reaccionan con basalto y andesita. Por el contrario, cuando se considera la actividad del Na<sup>+</sup>, el fluido indica que se puede formar la caolinita y la montmorilonita sódica; las rocas ácidas (piroclastos del campo Los Humeros) son, en este caso, más propicias para la formación de este tipo de arcillas.

La Figura 7 muestra un diagrama de estabilidad, con condiciones similares a las de la Figura 5, para una temperatura de 260 °C. En este caso, el campo de estabilidad de la caolinita aumenta sensiblemente, reduciéndose el de la montmorilonita. Si bien el enfriamiento proporciona una mayor estabilidad a la caolinita cálcica, éste no es el único factor. En efecto, en la misma figura se ha simulado el fluido geotérmico de uno de los pozos a diferentes condiciones de temperatura y pH, los cuales se representan por puntos en este diagrama, y la alineación del comportamiento esperado nos muestra que para un pH = 5 y t = 300-250 °C la caolinita es estable; sin embargo, a las mismas temperaturas pero diferente pH (pH = 7 para t = 250 y pH = 7.39 para t = 300 °C), se esperaría la formación de albita y microclino y no de caolinita. En consecuencia, al interpretar la distribución zonal de las arcillas en cualquier medio geológico, se debe considerar no sólo la temperatura, sino el pH del fluido y la

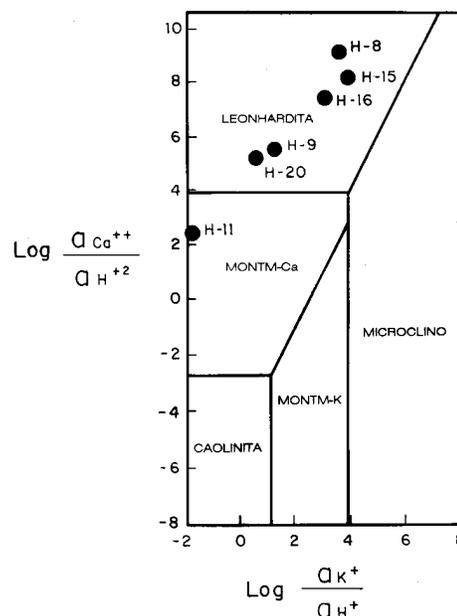


Figura 5.- Diagrama de actividad para Ca<sup>++</sup> y K<sup>+</sup> en presencia de cuarzo a 300 °C.

naturaleza de la roca encajonante, ya que, por ejemplo, la caolinita es estable, al menos en los casos presentados, hasta los 300 °C, si se mantiene un pH ácido.

#### CONCLUSIONES

La mineralogía presente en el campo geotérmico de Los Humeros refleja las características geológicas del yacimiento y las condiciones de alteración hidrotermal que han tenido lugar.

La actividad hidrotermal del yacimiento queda confinada principalmente al subsuelo del colapso central, el cual corresponde a la zona de mayor fracturamiento e incluye estructuras de dirección NW-SE predominante. Estas estructuras permiten el ascenso, atrapado y distribución de los fluidos a profundidad, los cuales se encuentran influenciados por una fuente de calor a más de 2 km de profundidad, que propicia asimismo la presencia de las áreas con mayor potencial en términos de explotación.

La composición litológica, registrada en los pozos, y la influencia del fluido propician la producción de los diversos minerales de neoformación, que están constituyendo distintas paragénesis mineralógicas a medida que se profundiza en el subsuelo. Así, se tiene las asociaciones poco hidratadas y ricas en Ca y/o K a profundidad moderada, y las asociaciones

Tabla 1.- Actividad de las especies químicas discutidas en los diagramas bajo condiciones iniciales en el yacimiento.

| POZO | ENTALPÍA (J/g) | TEMPERATURA (°C) | pH   | ACTIVIDAD DE LA FRACCIÓN FASE LÍQUIDA |                        |                        |                        |                                |
|------|----------------|------------------|------|---------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------|
|      |                |                  |      | Na <sup>+</sup>                       | K <sup>+</sup>         | Ca <sup>++</sup>       | H <sup>+</sup>         | (H <sup>+</sup> ) <sup>2</sup> |
| H- 8 | 2981           | 295              | 8.19 | 0.258x10 <sup>-2</sup>                | 0.237x10 <sup>-3</sup> | 0.624x10 <sup>-7</sup> | 6.457x10 <sup>-9</sup> | 4.17x10 <sup>-17</sup>         |
| H- 9 | 2578           | 300              | 5.99 | 0.177x10 <sup>-3</sup>                | 0.222x10 <sup>-4</sup> | 0.372x10 <sup>-6</sup> | 1.023x10 <sup>-6</sup> | 1.05x10 <sup>-12</sup>         |
| H-11 | 2661           | 286              | 5.03 | 0.127x10 <sup>-5</sup>                | 0.105x10 <sup>-6</sup> | 0.276x10 <sup>-7</sup> | 9.332x10 <sup>-6</sup> | 8.71x10 <sup>-11</sup>         |
| H-15 | 2186           | 300              | 7.58 | 0.18 x10 <sup>-2</sup>                | 0.201x10 <sup>-3</sup> | 0.139x10 <sup>-6</sup> | 2.630x10 <sup>-8</sup> | 6.92x10 <sup>-16</sup>         |
| H-16 | 2311           | 300              | 6.76 | 0.236x10 <sup>-2</sup>                | 0.204x10 <sup>-3</sup> | 0.960x10 <sup>-6</sup> | 1.737x10 <sup>-7</sup> | 3.02x10 <sup>-14</sup>         |
| H-20 | 2519           | 300              | 4.93 | 0.353x10 <sup>-3</sup>                | 0.392x10 <sup>-4</sup> | 0.346x10 <sup>-4</sup> | 1.175x10 <sup>-5</sup> | 1.38x10 <sup>-10</sup>         |

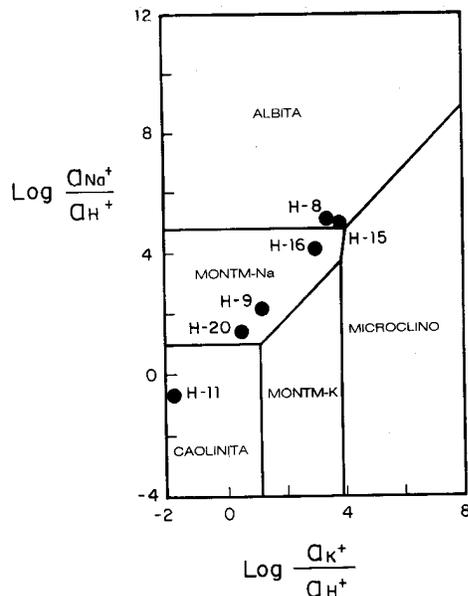


Figura 6.- Diagrama de actividad para Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup> en presencia de cuarzo a 300°C.

menos hidratadas y, o bien, anhidras y ricas en Mg en las zonas más profundas.

Mediante estudios de difracción de rayos X se pudo caracterizar las especies arcillosas de neoformación (caolinita, esmectita cálcica e ilita), la distribución espacial zonal relacionada con cada paquete litológico y una temperatura específica. Así tenemos, por ejemplo, que las rocas ácidas (ignimbritas) favorecen la formación de caolinita a una temperatura inferior a los 150°C; un cambio de litología y consecuentemente en la temperatura (aproximadamente a 200°C) da lugar a la formación de montmorilonita cálcica presentándose generalmente en rocas andesíticas y/o basálticas. Finalmente, la presencia de ilita puede darse en rocas tanto ácidas como intermedias, ya que su abundancia queda definida por el contenido de K en la roca y la temperatura del medio; si el medio continúa siendo más básico, la presencia de clorita aumenta.

La presencia de caolinita y montmorilonita en muestras de pozo a profundidades de 1,500-2,000 m indicaría mediante geotermometría de arcillas, una inversión térmica en el sistema; sin embargo, las temperaturas deducidas por análisis químicos y por inclusiones fluidas varían de 295 a 300°C, temperaturas no comunes para la formación de dichas arcillas, lo cual conduce a pensar que para el campo geotérmico de Los Humeros más que la temperatura es la composición química de la roca y el pH del fluido los que determinan esencialmente la formación de las arcillas.

#### AGRADECIMIENTOS

Se reconoce al Dr. Liberto de Pablo, del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, y al Dr. Emilio Galán, del Departamento de Geología de la Universidad de Granada, España, la revisión crítica del manuscrito original, que se vio, así, sustancialmente mejorado.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barragán-Reyes, R.M.; Faz-Pérez, Pedro; González-Partida, Eduardo; Guevara-García, Mirna; Izquierdo-Montalvo, Georgina; Nieva-Gómez, David; y Santoyo-Gutiérrez, Edgar, 1989, Estudio geoquímico, isotópico, mineralógico y de inclusiones fluidas aplicadas a la

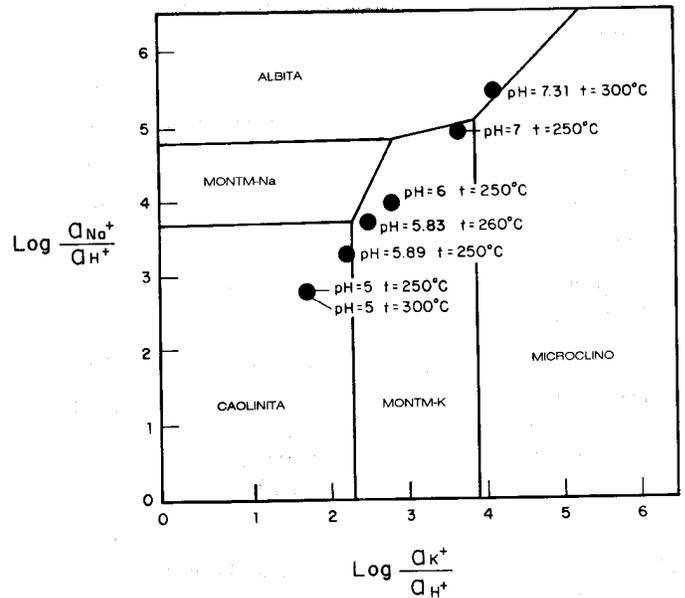


Figura 7.- Diagrama de actividad para Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup> en presencia de cuarzo a 260°C.

evaluación de los yacimientos geotérmicos de Los Azufres y Humeros, Puebla: Cuernavaca, Mor., Instituto de Investigaciones Eléctricas/11/25/2573/IDI/I, Proyecto Infraestructura, 110 p. (inédito).

- Barragán-Reyes, R.M., y Nieva-Gómez, David, 1989, EQYAC—Program for determining geothermal reservoir chemical equilibrium: Computers and Geosciences, v. 15, p. 1221-1240.
- Browne, P.R.L., 1970, Hydrothermal alteration as an aid in investigating geothermal fields: Geothermics, v. 2, p. 564-570.
- 1978, Hydrothermal alteration in active geothermal fields: Annual Review of Earth and Planetary Science, v. 6, p. 229-250.
- 1984, Lectures on geothermal geology and petrology: Islandia, National Energy Authority y United Nations University, eds., 93 p.
- Browne, P.R.L., y Ellis, A.J., 1970, The Ohaki-Broadlands hydrothermal area, New Zealand—mineralogy and related geochemistry: American Journal of Science, v. 269, p. 97-131.
- Cathelineau, Michel, y Nieva-Gómez, David, 1985, A chlorite solid solution geothermometer—the Los Azufres (Mexico) geothermal system: Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 91, p. 235-244.
- Elders, W.A., 1977, Petrology as a practical tool in geothermal studies: Geothermal Resource Council 1977 annual meeting, Davis, Calif., Geothermal—state of the art, Geothermal Resource Council Transactions, v. 1, p. 85-87.
- González-Partida, Eduardo; Barragán-Reyes, R.M.; Nieva-Gómez, David; Quijano-León, J.L.; López-Mendiola, J.M.; y Gutiérrez-Puente, Héctor, 1991, Estudio de inclusiones fluidas en cuatro pozos del campo geotérmico de Los Humeros, Pue.: Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía, v. 7, p. 185-199.
- Gutiérrez-Negrín, L.C.A., 1987, Geotermia—fuente de energía al alcance de México: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (México), Ciencia y Tecnología, núm. 73, p. 35-47.
- Nieva-Gómez, David; Barragán-Reyes, R.M.; Cervantes-Arenas, Marisela; Díaz-Curiel, Rafael; Garduño-Monroy, V.H.; González-Partida, Eduardo; Holguin-Prieto, Sergio; Meza-López, Francisco; Oliver-Hernández, Ricardo; Rosas-González, Nabor; y Sampedro-García, Antonio, 1989, Caracterización del fenómeno de corrosión por obturación de pozos de Los Humeros, Puebla: Informe final a C.F.E., IIE/3753/11/15/F, 68 p. (inédito).
- ProLedesma, R.M., 1990, Recent cooling in Los Humeros geothermal field, Mexico, inferred from clay minerals distribution: Geothermal Resource Council 1990 annual meeting, Kailua Kona, Hawaii, International symposium on geothermal energy, Geothermal Resource Council Transactions, v. 14, p. 959-964.

Steiner, A., 1977, The Wairakei geothermal area, North Island, New Zealand—its subsurface geology and hydrothermal rock alteration: New Zealand Geological Survey Bulletin 90, 136 p.

Viggiano-Guerra, J.C., y Robles-Camacho, Jasinto, 1988, Mineralogía hidrotermal en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla; parte 1, Sus usos como indicadora de temperatura y del régimen

hidrológico: Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía, v. 4, p. 15-28.

Manuscrito presentado: 25 de enero de 1991.

Manuscrito corregido devuelto por el autor: 12 de noviembre de 1991.

Manuscrito aceptado: 24 de febrero de 1992.