

## **Difracción de rayos X en la caracterización de especies arcillosas: un caso de aplicación en el pozo H29 del Campo de Los Humeros, Pue.**

Georgina Izquierdo-M.

*Instituto de Investigaciones Eléctricas, Depto. de Geotermia, Cuernavaca, México.*

Recibido: 1° de noviembre, 1991; aceptado: 11 de enero, 1993.

### **RESUMEN**

Los filosilicatos formados como producto de la alteración hidrotermal en zonas geotérmicas activas son de gran interés, ya que su ocurrencia es un reflejo de la temperatura y presión del medio. Así, los minerales arcillosos formados como producto de la alteración hidrotermal de las rocas en el yacimiento del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México, han sido caracterizados por difracción de rayos X (DRX). Como un buen ejemplo de aplicación de la DRX se seleccionó el pozo H29. Por medio de esta técnica, se identificaron en la fracción arcillosa de los recortes de perforación de este pozo caolinita, esmectita, illita y clorita. Por otro lado, se determinó el índice de cristalinidad en illitas y se calculó el contenido de Fe<sup>IV</sup> en cloritas. Los resultados muestran una transformación gradual de los filosilicatos en función de la composición de las rocas y de la temperatura del medio. Sin embargo a profundidad, la proporción relativa de esmectita en la fracción arcillosa es considerable.

**PALABRAS CLAVE:** Minerales arcillosos, filosilicatos, fracción arcillosa, Los Humeros, Difracción de Rayos X.

### **ABSTRACT**

Clay minerals formed by hydrothermal alteration of rocks in the geothermal field of Los Humeros, Puebla, Mexico, were analyzed by X-ray diffraction (XRD). Well H29 was selected. Kaolinite, smectite, illite and chlorite were identified in the clay fraction from drill cuttings. Crystallinity index of illites was estimated and Fe<sup>IV</sup> content in chlorites was calculated. The results show a gradual transformation of phyllosilicates as a function of rock composition and temperature. At depth, the proportion of smectite in the clay fraction is high.

**KEY WORDS:** Clay minerals, phyllosilicates, clay fraction, Los Humeros, X-Ray Diffraction.

### **INTRODUCCION**

El continuo desarrollo de recursos geotérmicos en México ha proporcionado una excelente oportunidad para llevar al cabo estudios mineralógicos, petrológicos y geoquímicos sobre muestras de núcleos y recortes obtenidos durante la perforación de pozos geotérmicos. Uno de los principales objetivos de estos estudios ha sido mejorar el entendimiento de los efectos de la alteración hidrotermal sobre las rocas del yacimiento.

Entre los minerales formados durante la interacción agua-roca se encuentra el grupo de los minerales arcillosos. Existen numerosos estudios acerca de su ocurrencia, mecanismos de formación y variaciones composicionales como respuesta a cambios de presión y temperatura del medio (Pollastro, 1985; Kristmannsdottir, 1977; Smart *et al.*, 1985, entre otros), pero escasos trabajos han sido realizados en sistemas hidrotermales mexicanos.

Existe una serie de estudios geocientíficos realizados en el campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán. Así, ha

sido posible desarrollar metodologías de estudio y llevar al cabo grandes aportaciones al entendimiento de la interacción agua-roca en ese sistema particular. Con la metodología implementada con anterioridad (Izquierdo *et al.*, 1986) y de acuerdo con los resultados obtenidos en el estudio sistemático de la fracción arcillosa de quince pozos del campo de Los Azufres (Izquierdo y Cathelineau, 1988; Izquierdo, 1988; Cathelineau e Izquierdo, 1988), se decidió extender este tipo de estudio a otros yacimientos geotérmicos (Los Humeros, Puebla y Chipilapa, El Salvador), de los cuales no se contaba con esta clase de información. En estos sistemas, se ha observado que la mineralogía de la fracción arcillosa muestra una fuerte dependencia de la composición de la roca y de la temperatura del medio. Por ejemplo, en riolitas es común encontrar caolinita a una temperatura menor de 120°C; esmectita e interestratificación de illita/esmectita ocurren a menos de 200°C y como componente dominante, arriba de 200°C, se presenta illita. Mientras que en andesitas la fase principal a temperatura menor de 220°C es la esmectita, en ocasiones se acompaña de interestratificación de clorita/esmectita. Entre 200 y 250°C es posible que existan esmectitas, clorita/esmectita

y clorita y a temperatura superior a 250°C la clorita es el mineral dominante.

En este trabajo se presentan únicamente los resultados obtenidos en el estudio por difracción de rayos X de la fracción arcillosa de los recortes de perforación del pozo H29 del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Dada la mineralogía de este pozo, es posible hacer una ilustración de la aplicación de la difracción de rayos X en la caracterización de filosilicatos en un sistema natural.

### EL CAMPO GEOTERMICO DE LOS HUMEROS, PUEBLA

Actualmente el campo geotérmico de Los Humeros es considerado como la tercera fuente de energía geotérmica en exploración dentro de la República Mexicana. A la fecha se han perforado 32 pozos, en su mayoría exploratorios. Los Humeros se encuentra localizado en el extremo oriental del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM), en los límites de los Estados de Puebla y Veracruz. La Figura 1 (tomada de Verma, 1985) muestra su ubicación dentro del CVM. Este campo se encuentra contenido dentro de una caldera, conocida como Caldera de Los Humeros (CLH).

La geología del campo geotérmico de Los Humeros se ha descrito ampliamente en varios trabajos (Pérez-Reynoso, 1978; Yañez-García y García-Durán, 1982; Verma y López M, 1982 entre otros). Por lo que en este trabajo únicamente se hace mención de las principales unidades

litológicas que forman el yacimiento de Los Humeros ya que posteriormente serán utilizadas como referencia.

Viggiano y Robles (1988) han delimitado cuatro unidades litológicas del subsuelo. La primera es constituida por andesitas basálticas con intercalaciones de basaltos. La segunda, evidenciando un visible contraste petrológico, está formada por ignimbritas líticas y vítreas; las primeras constituidas por fragmentos de andesitas, basaltos, calizas, hornfels y de intrusivos. La tercera unidad se caracteriza por la presencia de andesitas de augita y de hornblenda. Finalmente la cuarta unidad es un hornfels de calcita, diópsida, wollastonita y granate.

El pozo H29 se localiza en la parte central de la CLH, en la zona conocida como Colapso Central; con una profundidad máxima de 2200m. La Figura 2 (tomada de Castillo-Román *et al.*, 1991) muestra un mapa simplificado de la Caldera de Los Humeros y en ella la ubicación del pozo H29.

### PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Siguiendo la metodología establecida en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (Izquierdo *et al.*, 1986) se llevó al cabo la caracterización de los filosilicatos formados hidrotermalmente en el pozo H29. Los recortes de perforación se seleccionaron a intervalos de 50 a 100 m, o menores en el caso en el que ocurriera un cambio notable en la litología. Con el objeto de eliminar lodo de perforación

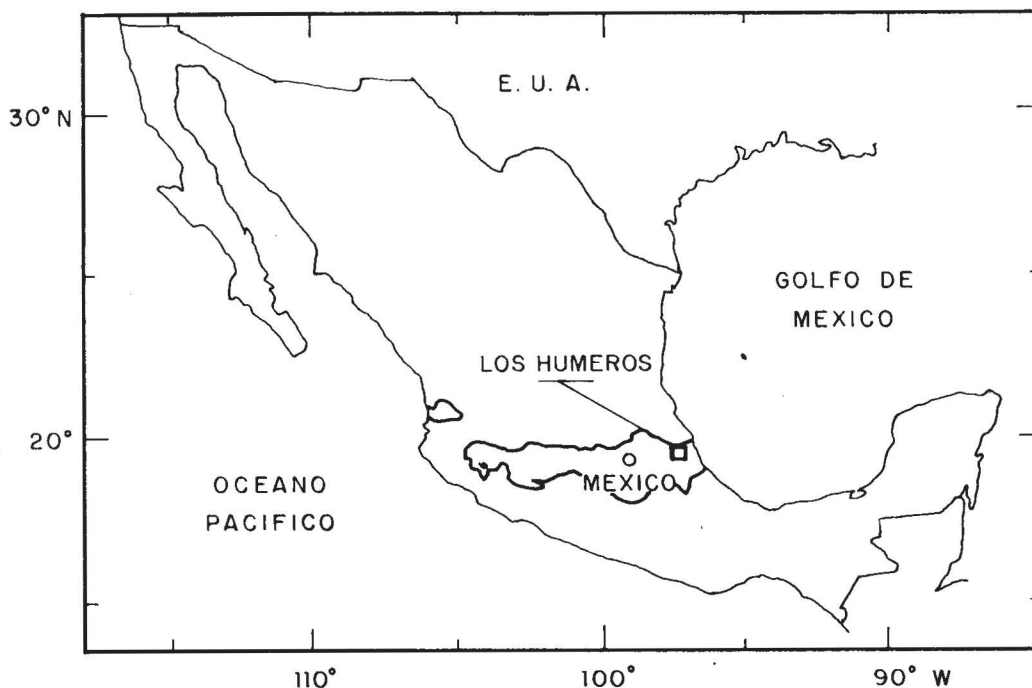


Fig. 1. Localización del campo geotérmico de Los Humeros dentro del CVM (tomado de Verma, 1985).

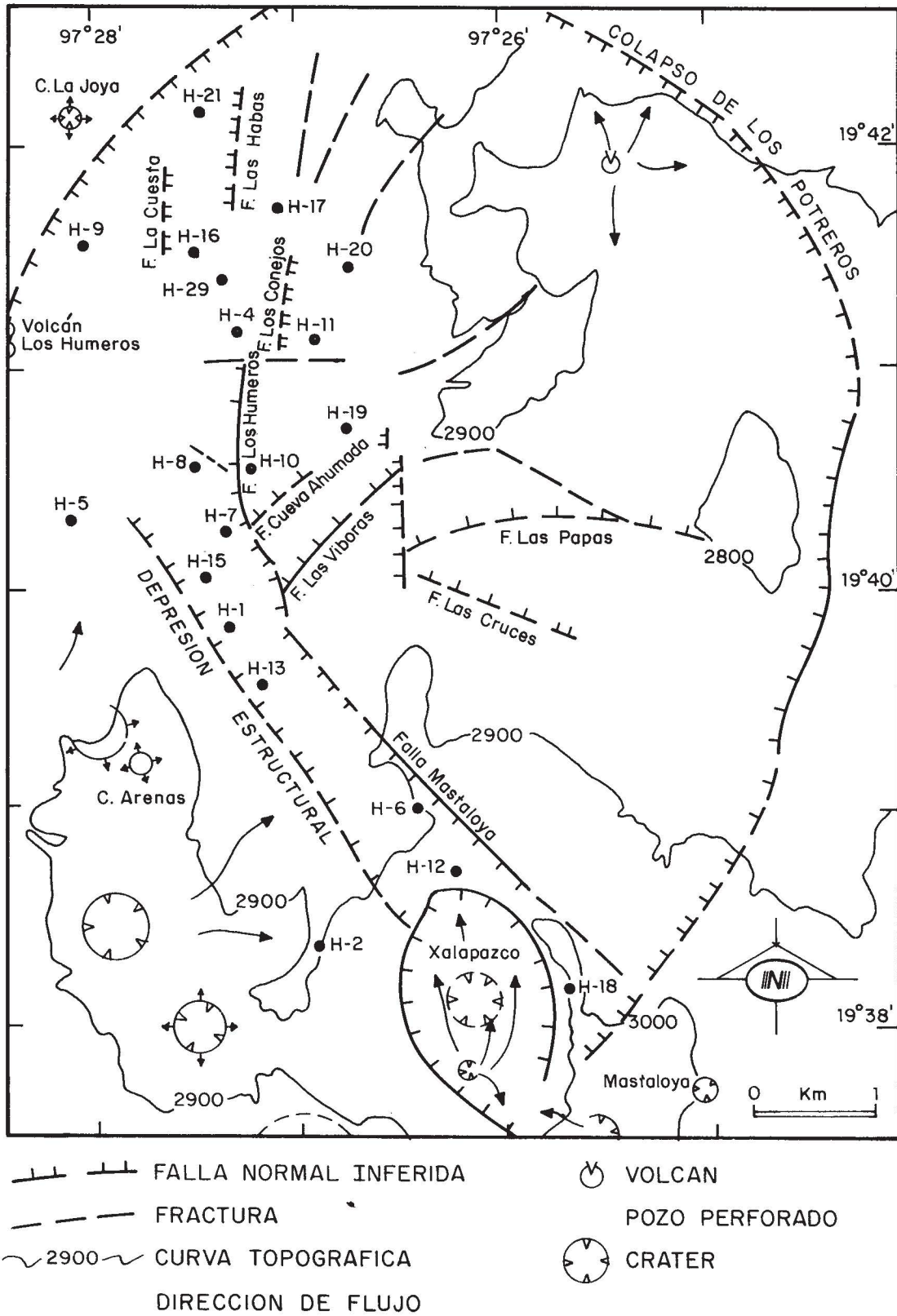


Fig. 2. Localización del pozo H29 dentro del mapa simplificado de la caldera de Los Hornos, Puebla (tomado de Castillo-Román et al., 1991).

que pudiera estar adherido a los recortes, las muestras se lavaron con agua destilada. Los filosilicatos se separaron en un baño de ultrasonido y por sedimentación se obtuvo la fracción arcillosa. Con la suspensión se prepararon láminas orientadas, las cuales fueron analizadas en un difractómetro Siemens D500, con radiación filtrada de cobre.

Para identificar esmectitas y minerales estratificados, todas las preparaciones se saturaron en una atmósfera de etilenglicol. La Figura 3 muestra el patrón de difracción normal y saturado con etilenglicol de dos muestras que contienen esmectitas.

El índice de cristalinidad de illitas se determinó midiendo el ancho a la altura media de la reflexión de 10 Å.

La abundancia relativa de cada mineral presente en la fracción arcillosa, se determinó por medio de la intensidad de la reflexión principal de cada especie. El perfil térmico se elaboró a partir de los datos disponibles de temperaturas de homogeneización medidas en inclusiones fluidas (Murillo, 1990), mostrando dos tendencias (Figura 4). Cabe mencionar que para este pozo no se cuenta con determinaciones actuales de temperatura.

#### IDENTIFICACION DE ESPECIES ARCILLOSAS

La identificación cualitativa de las distintas especies se llevó a cabo de la manera descrita en Izquierdo *et al.* (1986). Adicionalmente, casi en forma rutinaria, se recurrió a tratamientos térmicos con la finalidad de distinguir principalmente entre dos minerales: caolinita y clorita, los cuales en ocasiones pueden ser motivo de confusión.

De esta manera, siendo un patrón de difracción el reflejo de la estructura de un compuesto, es posible registrar en un difractograma los cambios estructurales provocados por distintos tratamientos térmicos.

En condiciones normales, el patrón de difracción de una muestra orientada de caolinita y clorita presenta reflexiones con un espaciamiento basal muy semejante. La Tabla 1 presenta las reflexiones basales de una clorita y de una caolinita en una muestra orientada. Si no se cuenta con una preparación muy buena, la diferencia entre los dos patrones son las reflexiones 003 y 005 de la clorita, las cuales en general son de baja intensidad. Por tal motivo en ocasiones se llega a interpretaciones erróneas. Por otro lado, la reflexión 006 de la clorita se resolverá dependiendo de la cantidad de ésta en la muestra. Teniendo en cuenta estas consideraciones, la identificación de la caolinita en presencia de clorita se basa, además de las reflexiones  $d_{001}$  y  $d_{002}$ , en la ocurrencia de la reflexión 003 y en cambios estructurales ocasionados por tratamientos térmicos. Así a alta temperatura, la caolinita se transforma a metacaolín, con pobre ordenamiento, razón por la cual se dice que se

Tabla 1

Reflexiones basales de una clorita y una caolinita en una muestra orientada.

Clorita		Caolinita	
d	hkl	d	hkl
14.1	001		
7.05	002	7.15	001
4.71	003		
3.54	004	3.56	002
2.82	005		
2.35	006	2.38	003

destruye la estructura original. Además, aparece en el difractograma una reflexión ancha entre 11 y 13 Å. Por otro lado, el calentamiento provoca un rearrreglo en la estructura de las cloritas, reflejándose en un aumento en la intensidad de la reflexión 001 y disminución en la intensidad de las reflexiones 002, 003 y 004.

#### RESULTADOS Y DISCUSION

Los filosilicatos identificados en la fracción arcillosa de los recortes de perforación del pozo H29 son: caolinita, esmectitas (raramente sódica y comúnmente cálcica), illita, clorita y biotita. Como minerales "contaminantes", se identificaron cuarzo, plagioclasas y en menor proporción anfíboles.

Cabe mencionar que en este trabajo, el término illita se empleó de acuerdo con Bradley y Grim (en Brindley y Brown, 1980 p.58), para nombrar minerales micáceos que muestran pequeñas desviaciones de la serie integral de 10 Å. Así especies micáceas con  $d_{001}$  entre 9.93 y 10.16 Å se les llama illitas.

En general, los resultados muestran que los filosilicatos formados en medios hidrotermales responden marcadamente a cambios de temperatura del medio y a la composición de la roca que les da origen. Un hecho que hasta el momento queda sin explicación es la presencia de esmectita en los recortes de perforación profundos, donde el perfil térmico indica temperaturas arriba de 250°C. Siendo que por el alto contenido de agua y su velocidad de reacción, las esmectitas son los minerales más susceptibles de ser afectados por el calor. Por lo tanto su ocurrencia no es compatible con las temperaturas estimadas por microtermometría de inclusiones fluidas.

La Figura 4 es un resumen de los resultados obtenidos para el pozo H29. En ésta se presenta la columna litológica (J.C. Viggiano y J. Robles, comunicación personal, 1990), la proporción relativa de los filosilicatos presentes en la

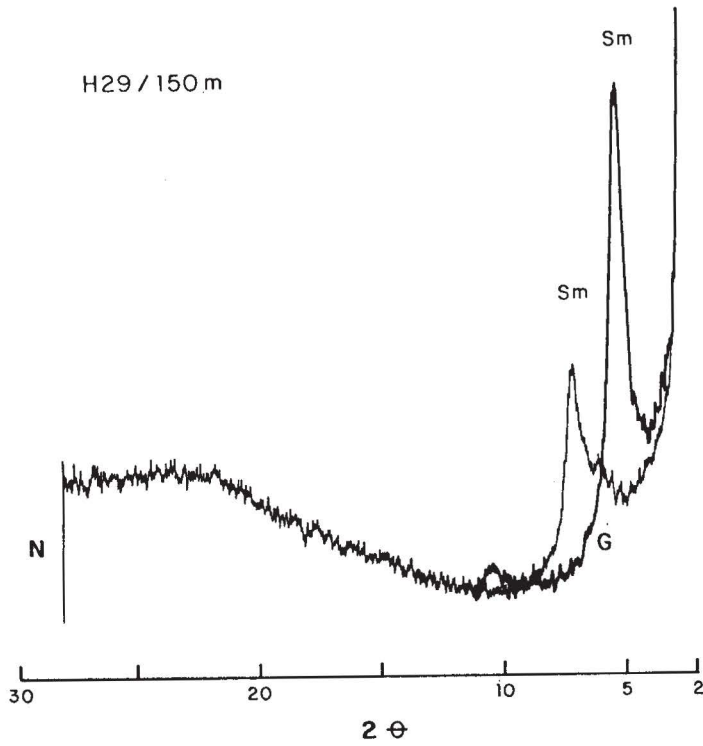


Fig. 3a. Patrón de difracción de la muestra H29/150m. Normal (N) y glicolada (G). Sm = Esmectita.

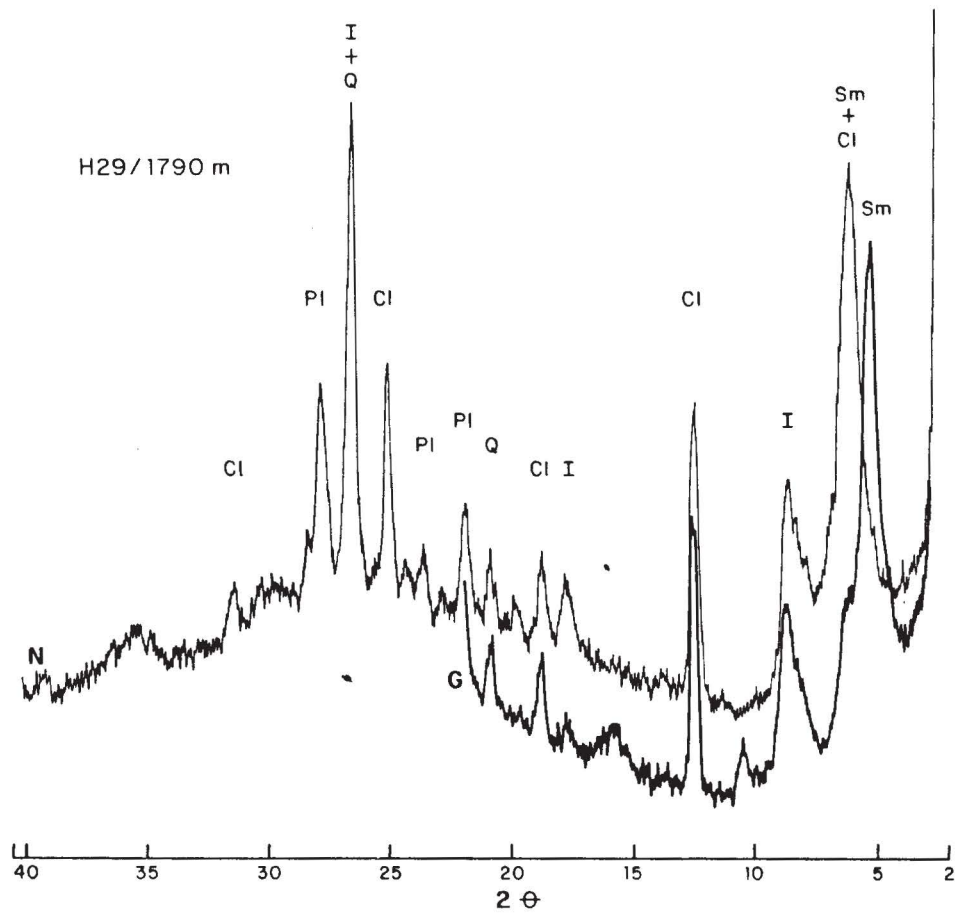


Fig. 3b. Patrón de difracción de la muestra H29/1790m. Normal (N) y glicolada (G). Sm = Esmectita, Cl = clorita, I = illita, PI = plagioclasas y Q = cuarzo.

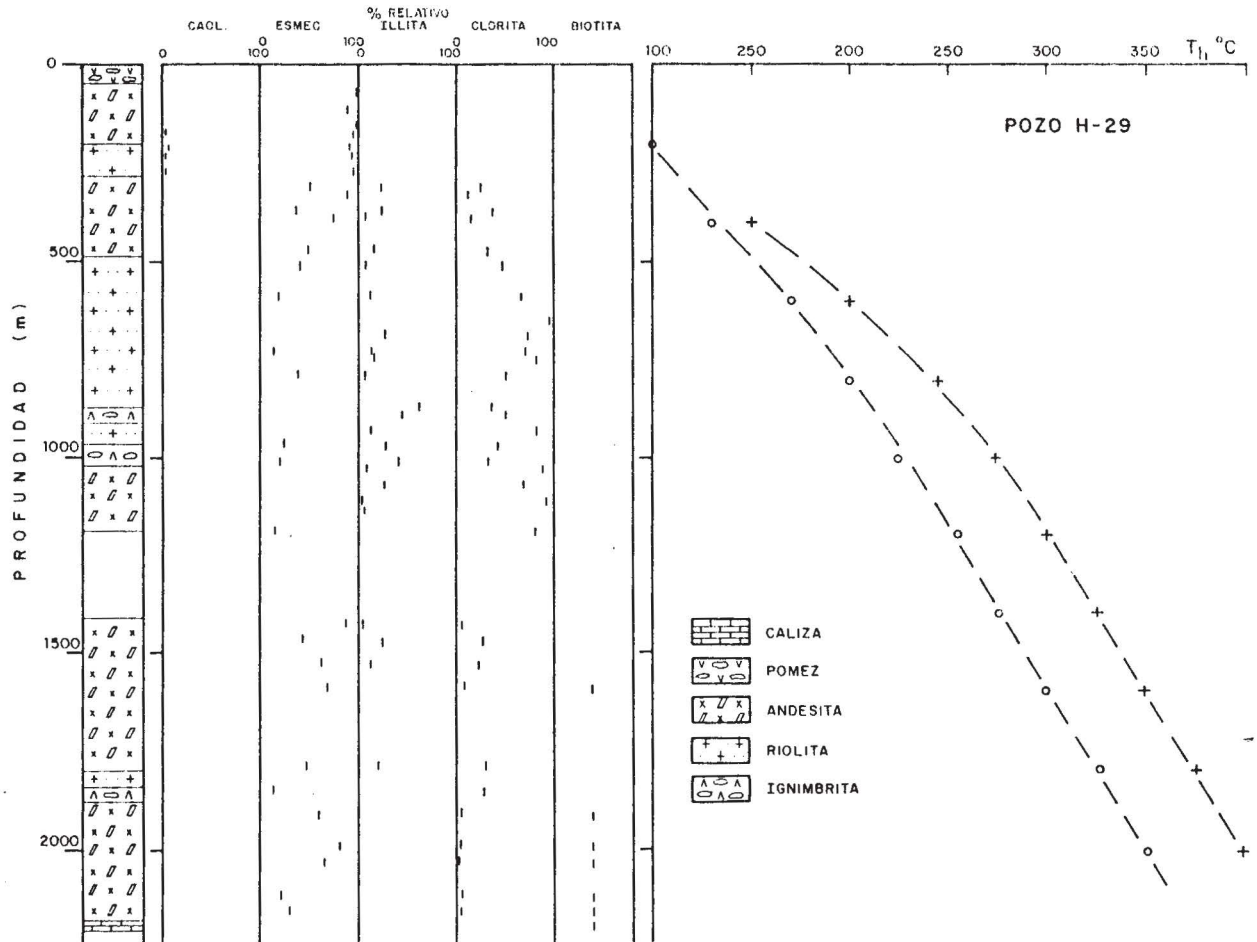


Fig. 4. Distribución, en función de la profundidad, de los filosilicatos presentes en la fracción arcillosa, columna litológica y perfil térmico para el pozo H29.

fracción arcillosa, el perfil térmico (basado en determinaciones microtermométricas), todo en función de la profundidad del pozo.

En este pozo, de 30 a 150m, la especie mineralógica principal es esmectita sódica. A partir de 170 y hasta 270m aparece en baja proporción la caolinita junto con esmectita que es el componente principal. En este rango de profundidad la columna litológica indica la existencia de andesitas y de una toba riolítica. La temperatura de acuerdo al perfil térmico, es menor a 90°C. A partir de 300m se tiene esmectita en mayor proporción, acompañada de clorita e illita. Después de 550m, donde la temperatura es próxima a 150°C, la clorita es el principal componente hasta 1190m. De 300 a 1010m la columna litológica está formada por tobas de composición riolítica lo que favorece la formación de illita. En este pozo la ocurrencia de interestratificados no es clara. Las muestras de varias profundidades (750, 870, 1790 y 1850m) tratadas con etilenglicol presentan indicios de interestratificación (illita/esmectita), aunque los patrones de difracción no permiten hacer una plena identificación de estos minerales. En las muestras de 870 a 930m no se determinó esmectita,

pero si una mezcla de illita y clorita. De 970 a 1010m ocurren en proporciones semejantes esmectita, illita y clorita. De 1030 a 1110m se identificaron únicamente illita y clorita, dominando esta última. De 1020 a 1790m la columna litológica está formada por andesitas, siendo la temperatura del medio cercana a 220°C. El patrón de difracción de la muestra a 1190m indica la presencia de esmectita y como componente principal la clorita. Desafortunadamente, no se cuenta con recortes de perforación a partir de 1190 y hasta 1430m.

De 1430 a 1790m se tiene una mezcla de esmectita como principal componente, illita y clorita y una temperatura superior a 250°C. Illita se identificó de 1790 a 1850m, donde de acuerdo con la columna litológica existe una unidad de composición félsica, siendo su presencia una clara respuesta a la composición de la roca. Para estas profundidades la temperatura es de 270°C aproximadamente. De 1910 a 2200m se identificó esmectita, biotita y clorita, en diversas proporciones; siendo biotita la fase principal en las muestras a 2190 y 2200m. Se ha considerado que la biotita pertenece al proceso hidrotermal profundo relacionado con el skarn.

Por otro lado, tomando en cuenta el perfil térmico obtenido por microtermometría, ya que no se dispone de determinaciones actuales, no es de esperarse la presencia de esmectita a elevadas temperaturas. R.M. Prol (comunicación personal, 1990) realizó en Nueva Zelanda un estudio sobre Los Humeros, empleando núcleos (en lugar de recortes de perforación) provenientes de diversos pozos y profundidades. En los más profundos detectó la presencia de esmectitas, proponiendo un enfriamiento del campo (Prol, 1990). Considerando las condiciones bajo las que este mineral puede existir ( $T < 220^{\circ}\text{C}$ ), la propuesta de R.M. Prol es válida. Sin embargo si las temperaturas obtenidas por microtermometría son reflejo de las actuales, deben existir factores cinéticos o de equilibrio que propician la presencia de esmectita a altas temperaturas.

Adicionalmente, empleando la DRX como una herramienta que proporciona detalles cristaloquímicos de un componente se determinó la composición de las cloritas presentes en este pozo (Oinuma *et al.*, 1972). Se debe tener en cuenta que los difractogramas fueron obtenidos en condiciones normales de medición, por lo que puede existir mayor incertidumbre al emplear los diagramas cristaloquímicos. A pesar de esto y considerando que la cantidad de Fe octaédrico muestra una correlación positiva con la temperatura (Cathelineau y Nieva, 1985), es posible observar una disminución del contenido calculado de Fe en función de profundidad especialmente de 1470 a 1690m (Tabla 2).

Tabla 2

Composición calculada de cloritas.

Prof.(m)	Composición
310	(Mg <sub>2.3</sub> Fe <sub>2.7</sub> Al) (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>
390	(Mg <sub>4.15</sub> Fe <sub>0.85</sub> Al) (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>
470	(Mg <sub>2.15</sub> Fe <sub>2.85</sub> Al) (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>
510	(Mg <sub>2.05</sub> Fe <sub>2.95</sub> Al) (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>
550	(Mg <sub>1.2</sub> Fe <sub>3.8</sub> Al) (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>
590	(Mg <sub>1.15</sub> Fe <sub>3.05</sub> Al <sub>1.8</sub> ) (Si <sub>2.2</sub> Al <sub>1.8</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>
650	(Mg <sub>1.4</sub> Fe <sub>2.8</sub> Al <sub>1.8</sub> ) (Si <sub>2.2</sub> Al <sub>1.8</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>
690	(Mg <sub>0.5</sub> Fe <sub>3.7</sub> Al <sub>1.8</sub> ) (Si <sub>2.2</sub> Al <sub>1.8</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>
890	(Mg <sub>1.1</sub> Fe <sub>3.1</sub> Al <sub>1.8</sub> ) (Si <sub>2.2</sub> Al <sub>1.8</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>
930	(Mg <sub>1.7</sub> Fe <sub>2.8</sub> Al <sub>1.8</sub> ) (Si <sub>2.2</sub> Al <sub>1.8</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>
970	(Mg <sub>2.16</sub> Fe <sub>3.1</sub> Al <sub>1.8</sub> ) (Si <sub>2.2</sub> Al <sub>1.8</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>
1030	(Mg <sub>1.25</sub> Fe <sub>2.9</sub> Al <sub>1.85</sub> ) (Si <sub>2.15</sub> Al <sub>1.85</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>
1070	(Mg <sub>2.6</sub> Fe <sub>2.8</sub> Al <sub>0.6</sub> ) (Si <sub>3.4</sub> Al <sub>0.6</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>
1110	(Mg <sub>1.45</sub> Fe <sub>2.7</sub> Al <sub>1.85</sub> ) (Si <sub>2.15</sub> Al <sub>1.85</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>
1190	(Mg <sub>2.5</sub> Fe <sub>2.5</sub> Al <sub>1</sub> ) (Si <sub>3</sub> Al <sub>1</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>
1470	(Mg <sub>3.55</sub> Fe <sub>1.45</sub> Al) (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>
1590	(Mg <sub>2.7</sub> Fe <sub>1.45</sub> Al <sub>1.85</sub> ) (Si <sub>2.15</sub> Al <sub>1.85</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>
1670	(Mg <sub>3</sub> Fe <sub>1.2</sub> Al <sub>1.8</sub> ) (Si <sub>2.2</sub> Al <sub>1.8</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>
1790	(Mg <sub>2.8</sub> Fe <sub>2.2</sub> Al) (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>
1850	(Mg <sub>1.15</sub> Fe <sub>3</sub> Al <sub>1.85</sub> ) (Si <sub>2.15</sub> Al <sub>1.85</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>

Coincidentemente, a estas profundidades aumenta la proporción de esmectita en a fracción arcillosa, sugiriendo temperaturas menores a las que indica el perfil térmico. Después de 1690m se observa un aumento en la cantidad de hierro, desafortunadamente después de 1850m la proporción de clorita disminuye dificultando la estimación de Fe.

Considerando que la estructura cristalina de las illitas muestra cambios en función de la temperatura, los cuales quedan registrados en su patrón de difracción, se ha empleado el índice de cristalinidad (I.C.) como un parámetro indicativo de evolución térmica del mineral. La Tabla 3 muestra el índice de cristalinidad medido en illitas del pozo H29.

Tabla 3

Índice de cristalinidad (I.C.) de illitas del pozo H29.

Prof.(m)	I.C.
310	3
370	4
390	2
470	8
510	5
550	4
590	2
690	5
730	6
750	6
790	5
870	4
930	3
970	2
1030	2
1070	2
1110	3
1430	2
1470	2.5
1530	*3
1590	*3.5
1670	*3
1790	6
1850	4
1910	*4.5
1990	*4
2030	*3.5
2110	*3
2150	*3
2200	*3

\*Biotita

Cabe mencionar que la determinación del I.C. se dificulta en patrones de muestras en las que el mineral ocurre en baja proporción y el I.C. es bajo, como es el caso de las muestras poco profundas.

De modo general, las illitas del pozo H29 presentan una tendencia al aumento progresivo de su cristalinidad en función de la profundidad. A partir de 1530m se identificó una mica cuyo patrón de difracción se asemeja al de la biotita, la que presenta un I.C. casi constante (3) aunque el mineral provenga de distintas profundidades. A 1790 y 1850m se presentó nuevamente illita, de baja cristalinidad, la cual puede asociarse a una menor temperatura; principalmente a 1790, donde la proporción de esmectita es significativa. De 1910m hasta la máxima profundidad del pozo se registró la presencia de biotita, la cual fue identificada petrográficamente como biotita primaria (D. Rentería, comunicación personal, 1990), considerándose propia del proceso metamórfico profundo.

### CONCLUSIONES

Por medio de difracción de rayos X se han caracterizado los filosilicatos formados hidrotermalmente en el pozo H29 del campo geotérmico de Los Humeros.

Las especies arcillosas muestran una evolución en función de la temperatura y de la profundidad de cada pozo, así como fuerte dependencia de la composición de la roca. Una excepción ocurre en las muestras profundas, donde dada la composición de la roca y la temperatura del medio debería presentarse clorita como principal componente y en menor proporción esmectita, ocurriendo en este caso lo contrario; por lo que trabajo adicional será necesario para explicar este hecho.

Para el pozo H29, la presencia de caolinita se limita a composiciones félsicas y a temperatura menor a 100°C.

Así, la presencia de esmectita, el decremento de Fe<sub>vi</sub> en las cloritas y la variación del I.C. de las illitas a profundidad, sugieren temperaturas menores a las que se han determinado. Por lo que su ocurrencia tiene un significado, que no es compatible con las temperaturas estimadas por microtermometría de inclusiones fluidas.

### AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a los árbitros de Geofísica Internacional y al Dr. S.P. Verma por sus comentarios y sugerencias durante la revisión del manuscrito. Así mismo agradece al Sr. Rubén Ponce R. el apoyo proporcionado con la preparación de muestras y el análisis por difracción de rayos X de las mismas y al Sr. Adrián Patiño por la elaboración de los dibujos.

### BIBLIOGRAFIA

- BRINDLEY, W.G. y G. BROWN, 1980. Crystal structures of clay minerals and their x-ray identification. Mineralogical Society. 495 p.
- CATHELINÉAU, M. y D. NIEVA, 1985. A chloride solid solution geothermometer. The Los Azufres Mexico geothermal system. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 91, 235-244.
- CASTILLO-ROMAN, J., S.P. VERMA y J. ANDAVERDE, 1991. Modelación de temperaturas bajo la Caldera de Los Humeros, Puebla, México, en términos de profundidad de la cámara magmática. *Geofis. Int.*, 30, 149-172.
- CATHELINÉAU, M. y G. IZQUIERDO, 1988. Temperature-composition relationships of authigenic micaceous minerals in the Los Azufres geothermal system. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 100, 418-428.
- IZQUIERDO, M.G. 1988. Caracterización de yacimientos geotérmicos por medio de la determinación de parámetros fisicoquímicos. Cap. 3. Informe final, IIE/11/2386/I 01/F.
- IZQUIERDO, G. y M. CATHELINÉAU 1987. Evolución de minerales arcillosos en el yacimiento de Los Azufres, Mich. y su uso como termoindicadores. Memorias del Simposio Internacional sobre Desarrollo y Exploración de Recursos Geotérmicos, Cuernavaca, Méx., 189-193.
- IZQUIERDO, G., M. CATHELINÉAU y D. NIEVA, 1986. Estudio de la estructura hidrológica y de la distribución de parámetros fisicoquímicos en el yacimiento de Los Azufres, Mich. Fase II., IIE/11/2011/I 03/P.
- KRISTMANNSDOTTIR, H. 1977. Types of clay minerals in hydrothermally altered basaltic rocks, Reykjanes, Iceland. *Jokull*, 26, 30-39.
- MURILLO, T.R.M. 1990. Estudio microtermométrico por medio de la técnica de inclusiones fluidas de diferentes pozos del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. Tesis I.P.N. 56 p.
- OINUMA, K., S. SHIMODA y T. SUDO, 1972. Triangular diagrams in use of a survey of crystal chemistry of chlorites. Proc. Kaolin Symp. Int. Clay Conf. Madrid.
- PEREZ, R.J. 1978. Geología y petrografía de la Caldera de Los Humeros. *Rev. Geomimet.* 3a. Epoca No 91, 97-106.



- POLLASTRO, R.M., 1985. Mineralogical and morphological evidence for the formation of illite at the expense of illite/smectite. *Clays and Clay Min.*, 33, 265-274.
- PROL, R.M., 1990. Recent cooling in Los Humeros geothermal field, Mexico, inferred from clay minerals distribution. *Geotherm. Res. Coun. Trans.*, 14, Part II, 959-964.
- SMART, G. y T. CLAYTON, 1985. The progressive illitization of interstratified illite/smectite from carboniferous sediments of Northern England and its relationship to organic maturity indicators. *Clay Min.*, 20, 455-466.
- VERMA, S.P, 1985. Heat Source in Los Humeros geothermal area, Puebla, Mexico. *Geoth. Res. Coun. Trans.*, 9, Part I, 521-525.
- VERMA, S.P y M. LOPEZ-M., 1982. Geochemistry of Los Humeros Caldera, Puebla, Mexico. *Bull. Volcanol.*, 45, 63-79.
- 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. *Geot. Rev. Mex. Geoener.*, 4, 15-28.
- YAÑEZ GARCIA, C. y S. GARCIA DURAN, 1982. Exploración geotérmica Los Humeros-Las Derrumbadas, Estados de Puebla y Veracruz. CFE Reporte interno. No 96.
- 
- Georgina Izquierdo M.  
*Instituto de Investigaciones Eléctricas  
Depto. de Geotermia Apdo. Postal 475,  
Cuernavaca, Mor. 62000 México.*