

**MONTMORRILLONITA DE ESTRUCTURA
INTERESTRATIFICADA**

CONTENIDO

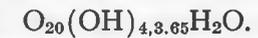
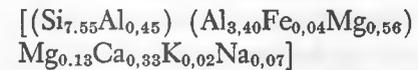
RESUMEN	25
INTRODUCCIÓN	25
Datos experimentales	26
Difracción de rayos X	29
Absorción infrarroja	34
Microscopía electrónica	37
Análisis químico	37
CONCLUSIONES	38
Bibliografía	39
Tablas	
I. Análisis químicos condensados de vapor	27
II. Variación de la temperatura en algunos pozos	28
III. Distancias interplanares de la arcilla interestratificada	33
IV. Frecuencia de las absorciones de espectrometría infrarroja	36
V. Análisis químico de iones calculados de la arcilla interestratificada	38
Ilustraciones	
1. Registros de difracción de rayos X	30
2. Registros de difracción de rayos X	31
3. Registros de difracción de rayos X	32
4. Transformación unidimensional de Fourier de las distancias interplanares	35
5. Registro de absorción infrarroja	36
6. Micrografías electrónicas	
7. Micrografías electrónicas	

MONTMORRILLONITA DE ESTRUCTURA INTERESTRATIFICADA

LIBERTO DE PABLO GALÁN *

RESUMEN

La acción de vapores magmáticos sobre rocas andesíticas, en la zona de actividad geotérmica de Pathé, Estado de Hidalgo, México, ha producido una compleja asociación mineralógica en la que se identifica una montmorillonita dioctahédrica interestratificada, con capas de agua, de fórmula calculada:



La interpretación de los datos de rayos X, según la transformación unidimensional de Fourier, indica probabilidades de 0.48 y 0.52 respectivamente para las capas montmorillonita y de agua, que no concuerdan rigurosamente con la fórmula calculada. Por absorción de infrarrojo se deduce abundante sustitución tetra y octahédrica y deformación de la láttice, mientras que micrografías electrónicas indican cristalitas enrollados de aproximadamente 0.2 x 0.04 micrones. Se presentan análisis químicos del condensado del vapor magmático, que actúa a 150° y presión de 2.77 Kg/cm², manteniendo un ambiente muy húmedo, a 270°, en la veta muestreada.

INTRODUCCIÓN

Los minerales arcillosos se originan por alteración hidrotermal o por intemperización de tectosilicatos. En su estudio, es importante establecer qué procesos ocurrieron, cómo afectaron al mineral o qué otros minerales se formaron. De aquí, el interés en establecer las características y diferencias entre las arcillas hidrotermales y aquellas de intemperización.

En el curso de una investigación más amplia sobre arcillas de origen hidrotermal, el autor realizó algunos estudios en la zona geotérmica de Pathé

* Investigador Titular del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Estado de Hidalgo, México, donde la acción de vapores del suelo sobre rocas volcánicas, ha producido una compleja asociación de minerales arcillosos. Entre éstos, se identificó uno que no pudo, satisfactoriamente, clasificarse dentro de los grupos mineralógicos clásicos y, del que, conociendo sus características paragenéticas, se consideró interesante estudiar detalladamente, con los resultados que a continuación se indican.

Sobre la geología de la zona de Pathé, Hgo., varios autores (De Anda, 1954; Alonso y otros, 1964; Mooser, 1964 y 1966) coinciden en que son tobas y lavas andesíticas y riolíticas del Terciario, en derrames más o menos paralelos, descansando sobre calizas. Vapores del subsuelo, conteniendo Na^+ , Cl^- , $\text{CO}_3^{=}$, SiO_4^{-4} , $\text{SO}_4^{=}$, $\text{S}^=$, CA^{++} , etcétera (tabla I), con presión máxima medida de 24.5 Kg/cm^2 , correspondiente a 221° , y valores normales de 2.77 Kg/cm^2 y 151.5° , actuando sobre dichas rocas, han producido caolinita, montmorillonita, hidrómica, arcillas estratificadas y zeolitas. El vapor escapa a la superficie por un sistema de fallas entrecruzadas, en donde la formación de arcillas es más abundante. Las temperaturas directamente medidas en pozos que se perforaron buscando vapor se indican en la tabla II.

Las arcillas se presentan como vetas de hasta 2 mt. de ancho, limitadas por paredes de calcedonia, en la andesita. El mineral dominante es montmorillonita, asociada a arcillas de estructura interestratificada, calcedonia, escasas zeolitas, yeso y azufre. Cuando la alteración es sobre rocas riolíticas, se forma caolinita, siendo pirita la principal impureza. La alteración es extremadamente rápida, al grado de observarse la transformación de roca a arcilla en periodos de meses.

En muestras colectadas en dichas vetas de arcilla, en rocas andesíticas, se identificó un mineral de reflexiones básicas altas, que no pudo clasificarse satisfactoriamente, dentro de los grupos normalmente aceptados. La revisión de los datos para éstos (Brown, 1961) o para minerales de altos espaciamientos (Hendricks y Teller, 1942; Heystek, 1954; Bystron, 1954; McEwan, 1965a; Brindley, 1956; MacEwan, 1958; Hamilton, 1967), sugirió al autor la conveniencia de un estudio completo que estableciese su identidad.

DATOS EXPERIMENTALES

En una mina, en la zona geotérmica de Pathé, Hidalgo, de la que se extrae arcilla para uso cerámico, se colectaron muestras a diferentes profundidades. La arcilla se presenta en vetas, entre paredes de calcedonia, en andesita; a

través de ellas o de fracturas en la roca se filtra vapor, a 151° y 2.77 Kg/cm^2 , o condensados que mantienen un ambiente húmedo de 32° a 18 mts. que aumenta con la profundidad. La alteración de la andesita es enérgica y se completa en periodos de meses. El análisis de los condensados se indicó en la tabla I.

Se colectaron ejemplares: 1) A la entrada de la mina, donde la arcilla está asociada a abundante yeso y hematita; 2) A profundidad de 10 mt. y temperatura ambiente de 25° ; 3) A 15 mt. y 27° ; 4) A 18 mt. y 32° . Se mantuvieron en recipientes cerrados de polietileno hasta su análisis por las técnicas mineralógicas comunes, sin recibir ninguna preparación adicional fuera de dispersión ultrasónica; sedimentación cuando fue necesario, y secado sobre ácido sulfúrico. Los estudios de difracción de rayos x se hicieron en un difractor Philips, radiación filtrada $\text{CoK}\alpha$, ángulos de Bragg 2° a 70° , sobre muestras naturales y glicoladas. Observaciones de microscopía electrónica fueron con una

TABLA I

ANÁLISIS QUÍMICOS DE CONDENSADOS DE VAPOR DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE PATHÉ, HIDALGO *

Ca^{++}	14.40 ppm
Mg^{++}	8.76
Na^+	345.69
NH_4^+	9.50
Cl^-	220.00
$\text{S}^=$	22.17
$\text{SO}_3^=$	13.50
$\text{CO}_3^=$	105.60
HCO_3^-	62.92
$\text{SO}_4^=$	189.28
SiO_2	132.50

* Comisión Federal de Electricidad, 1968.

TABLA II

VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN ALGUNOS POZOS DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE PATHÉ, HIDALGO *

Pozo	Profundidad (mt.)	Temperatura (°C)	
12	34	55	
	46	65	
	93	70	
	156	84	
	180	95	
	529	100	
3	27	107	
	40	112	
	86	127	
	142	141	
	256	163	
	14	4	60
14	10	50	
	18	69	
	28	84	
	43	108	
	13	24	116
	13	54	120
74		123	
86		125	

* Comisión Federal de Electricidad, 1968.

unidad Philips EM100, con material dispersado ultrasónicamente y depositados sobre colodión. Los espectros de absorción infrarrojo se obtuvieron con un espectrómetro Perkin Elmer 21 de doble haz, óptica de cloruro sódico, dispersión en bromuro potásico o Nujol, frecuencias de 400 a 4000 cm^{-1} . Los análisis químicos fueron según las técnicas convencionales para el análisis de silicatos.

Para estudiar el mineral interestratificado, la muestra 3 (de 15 mt. de profundidad, a 27°) se sedimentó a tiempos variables para separar cuarzo y calcedonia de la arcilla. Las fracciones que se separaron se examinaron por las mismas técnicas indicadas.

Difracción de rayos x

Los registros de difracción de rayos x de especímenes no orientados se presentan en la fig. 1. Son similares e indican cuarzo y posible montmorrillonita, de reflexión básica de primer orden a 15-15.5A que, con glicol, se desplaza a 16.8-17.4A. Otras reflexiones ocurren a 9.10A, 5.05 y 3.05 que no permiten la clasificación simple del mineral como montmorrillonita, saponita, beidelita o ilita (1M, 2M, o 3T).

Intentando una mejor resolución, se examinaron los sedimentos separados de la muestra 3, con los resultados que se indican en la fig. 2 y, después de tratados con glicol, en la fig. 3. Se observa que el cuarzo logra reducirse a niveles aceptables después de prolongado asentamiento de 70 hrs. pero permanece una reflexión a 3.34A que se atribuye a la arcilla. Ésta se clasifica tentativamente como montmorrillonita dioctahédrica (006 a 1.49A), con reflexiones anómalas a 9.00A, 5.10, 3.34 y 3.02 que sugieren algún tipo de interestratificación. Con glicol las reflexiones 9.00 y 5.01 se desplazan hacia 9.25A y 5.60, reduciendo su intensidad, mientras que 4.48A, 3.34 y 3.02 permanecen inalterables. Las distancias interplanares e intensidades medidas se indican en la tabla III.

Es evidente que el mineral corresponde a una estructura con algún tipo de interestratificación. El cálculo de ésta se hace según el modelo matemático de Mac Ewan (1956b) por transformación unidimensional de Fourier.

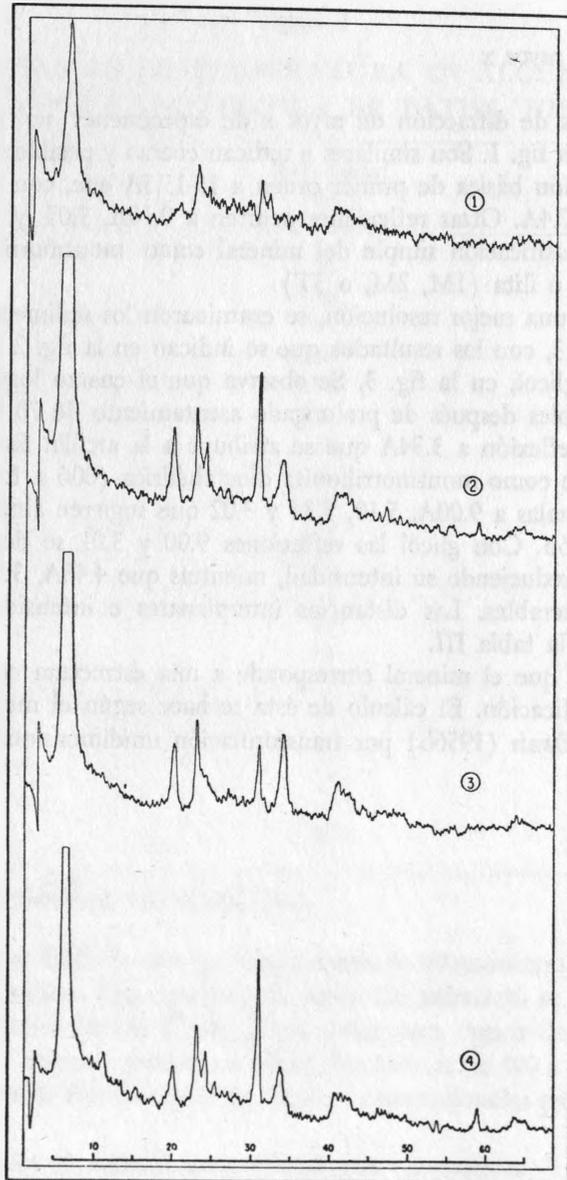


Figura 1. Registros de difracción de rayos x de arcillas de la zona geotérmica de Pathé, Hgo. Radiación $\text{CoK}\alpha$; 1) a 10 mt. de profundidad y 25° ; 2) a 15 mt. y 27° ; 3) a 18 mt. y 32° ; 4) a 10 mt. y 25° .

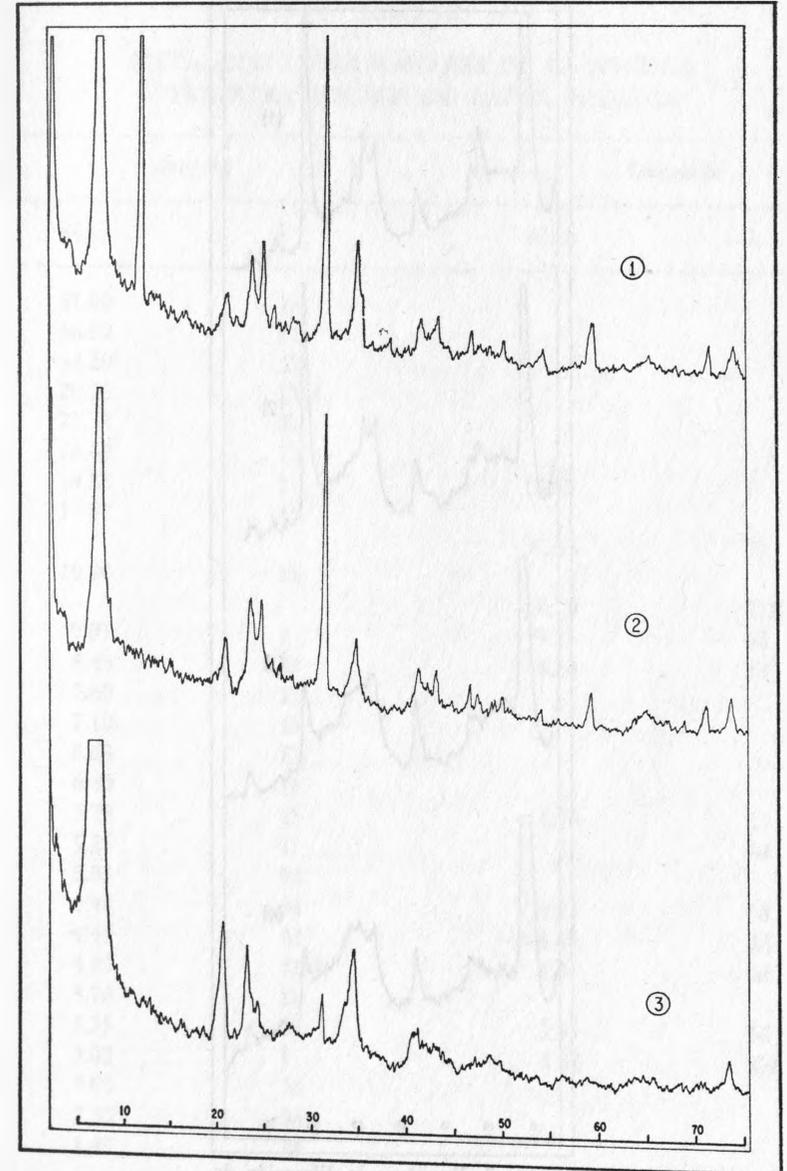


Figura 2. Registros de difracción de rayos x de fracciones sedimentadas de la muestra 3. Radiación $\text{CoK}\alpha$ 1) después de 10 min. de asentamiento; 2) 30 mm.; 3, 70 hrs.

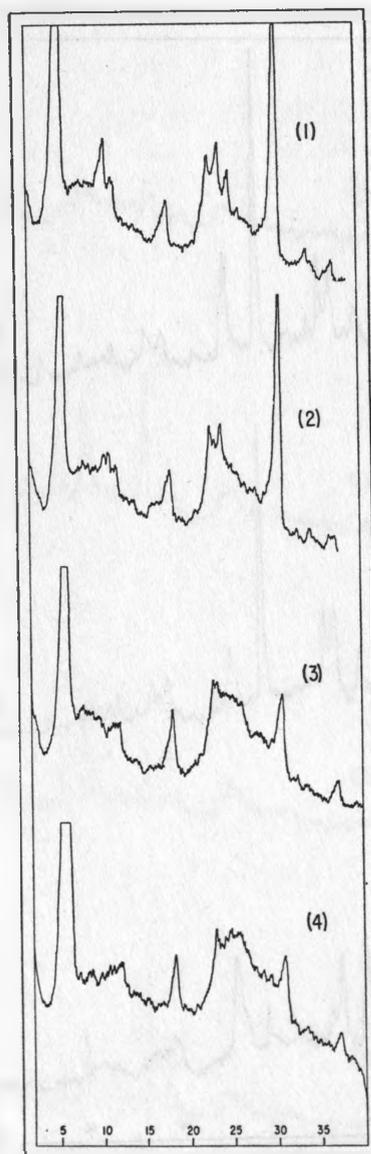


Figura 3. Registros de difracción de rayos x de fracciones sedimentadas de la muestra 3 y glicoladas. Radiación $\text{CoK}\alpha$; 1) después de 10 min. de asentamiento; 2) 20 min.; 3) 31 hrs.; y 4) 70 hrs.

TABLA III

DISTANCIAS INTERPLANARES DE LA ARCILLA INTERESTRATIFICADA DE PATHÉ, HIDALGO

Original		Glicolada	
d(A)	I	d(A)	I
41.00	D		
36.60	D		
34.20	D		
29.20	DM		
20.52	D		
18.60	D		
14.85	I	17.65	I
12.82	D		
		12.43	D
10.90	D		
		9.70	DM
9.01	I	9.25	M
8.40	D	8.64	D
7.60	D		
7.10	D		
6.63	D		
6.40	D		
5.78	D	5.78	D
5.25	D	5.62	M
5.03	M		
4.48	M	4.48	M
4.45	M	4.40	M
4.05	DM	4.06	M
3.70	D		
3.35	M	3.35	M
3.02	I	3.02	DM
3.00	M		
2.55	M		
1.49	M		

La solución que se presenta en la fig. 4 se calcula de las distancias interplanares e intensidades relativas (tabla III), los factores angulares de intensidad de las Tablas Internacionales (Kasper y Lonsdale, 1967) y el factor de estructura de Cole y Lancucki (1966) para capas tipo montmorrillonita cálcica $(Al_6Mg)Si_8O_{20}(OH)_4$, con $0.67 Ca^{++}$. Se concluye que la arcilla es de estructura interestratificada, de capas de 9A y 18, con probabilidades $(P_A)_9$ y $(P_B)_{18}$ de 0.52 y 0.48, respectivamente.

Absorción infrarroja

Espectrometría de absorción de infrarrojo —fig. 5, tabla II— indica, en la capa tetrahédrica, sustitución de Si^{4+} por Al^{3+} , que se mide por la absorción a frecuencia de 690 cm^{-1} (Si-O), el doblete a 774 cm^{-1} y 798 cm^{-1} reemplazando a la banda Si-O-(Al) de 860 cm^{-1} y por el desplazamiento a 463 cm^{-1} y 528 cm^{-1} de las bandas Si-O y Si-O- Al^{VI} de 473 cm^{-1} y 535 cm^{-1} respectivamente (Stubican y Roy, 1961 a, b, c).

En la capa octahédrica, los mismos autores reportan que la sustitución de Mg^{2+} por Al^{3+} en las montmorrillonitas desplaza la banda Si-O hacia 1000 cm^{-1} y 1030 , debilita O-H-Al a 935 cm^{-1} y mueve Si-O- Al^{VI} de 535 cm^{-1} hacia frecuencias mayores.

Por otra parte, comparando con las fengitas dioctahédricas (Stubican y Roy, 1961), la absorción O-H-Al a 919 cm^{-1} y la ausencia de efectos débiles entre 600 cm^{-1} y 850 , atribuibles a la deactivación de vibraciones por la sustitución Mg- Al^{VI} , sugieren baja sustitución octahédrica.

Dos situaciones opuestas parecen presentarse para el mineral de Pathé. Por una parte, la absorción H-O-Al a 919 cm^{-1} sugiere escasa sustitución catiónica octahédrica, mientras que la de 528 cm^{-1} , atribuible a Si-O- Al^{VI} , aparentemente desplazada desde 535 cm^{-1} , admite la posibilidad de alta

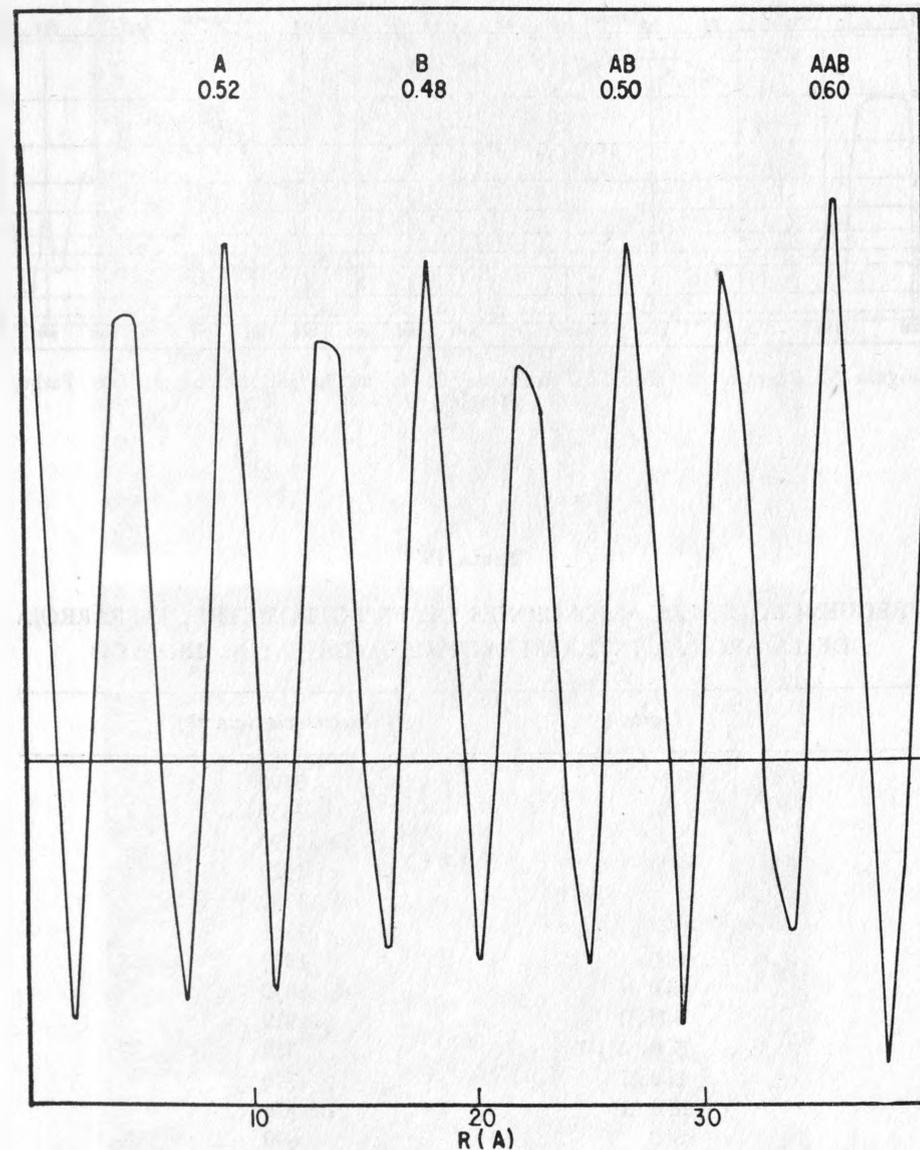


Figura 4. Transformación unidimensional de Fourier de las distancias interplanares de la arcilla interestratificada de Pathé, Hidalgo.

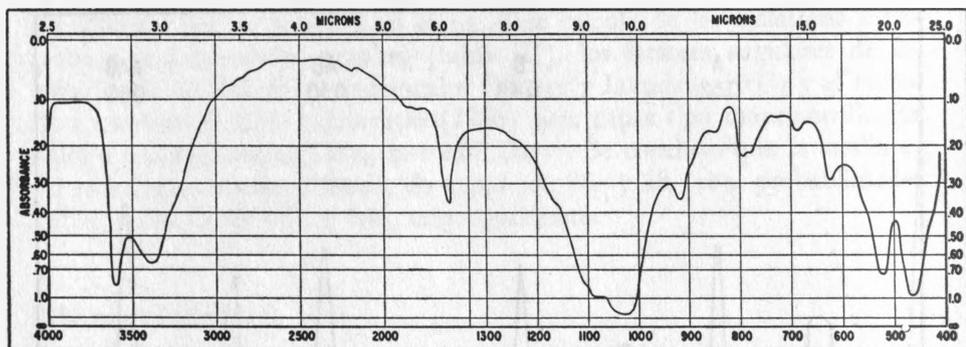


Figura 5. Registro de absorción infrarroja de la arcilla interestratificada de Pathé, Hidalgo.

TABLA IV

FRECUENCIA DE LAS ABSORCIONES DE ESPECTROMETRÍA INFRARROJA DE LA ARCILLA INTERESTRATIFICADA DE PATHÉ, HIDALGO

Unión	Frecuencia (cm ⁻¹)
OH	3590
	3380
	2190
	1620
	1380
	1166
Si-O	1083
Si-O	1030
O-H-Al	919
Si-O-(Al) ^{IV}	850
Si-O-Al	798
Si-O-Al	774
Si-O	690
Si-O	625
Si-O-Al ^{VI}	528
Si-O	463

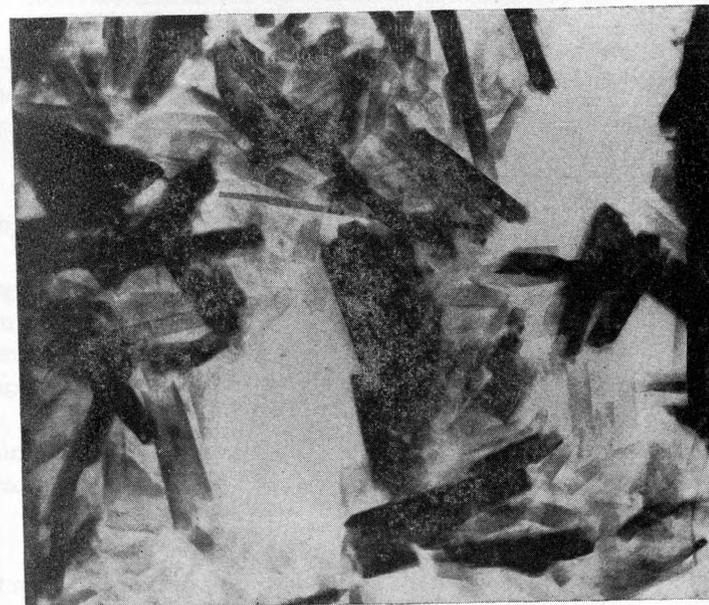


Figura 6. Micrografías electrónicas de la arcilla interestratificada mica-montmorillonita de Pathé, Hidalgo.

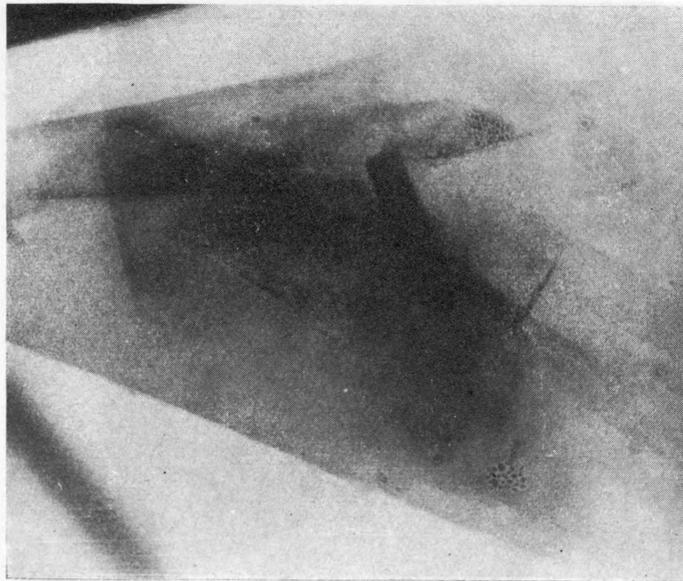
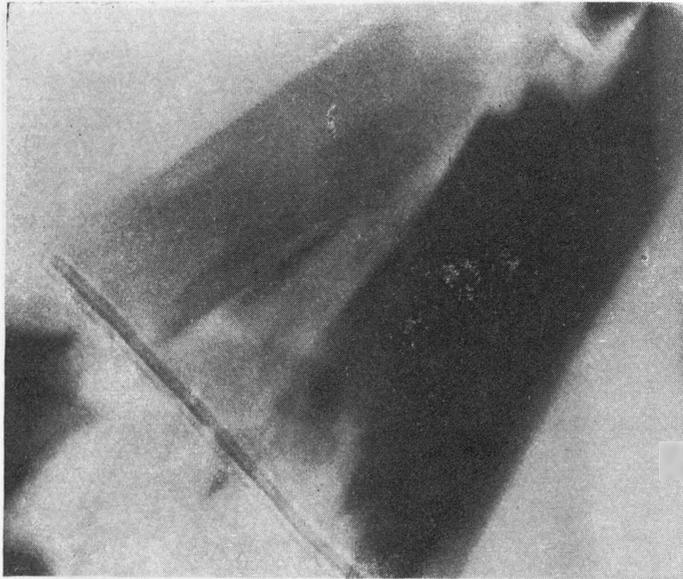


Figura 7. Micrografías electrónicas de la arcilla interestratificada de Pathé, Hidalgo.

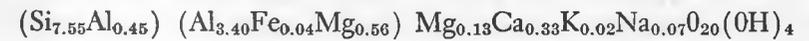
substitución octahédrica. Por lo pronto y dada la escasa información pertinente, es preferible resolver este problema dentro de la discusión general, considerando otros datos analíticos.

Microscopía electrónica

Micrografías electrónicas de dispersiones del mineral arcilloso —figs. 6 y 7— muestran cristalitas delgadas irregulares, enrollados a formas cilíndricas de extremos pseudo-hexagonales no muy bien definidos. Su longitud y diámetro promedio son de 0.2 x 0.04 micrones respectivamente, debiendo ser el espesor bastante reducido. En ningún caso fue posible obtener registros claros de difracción electrónica sino más bien imágenes borrosas, de simetría hexagonal, que parecen confirmar el enrollamiento sobre los ejes *a* o *b*.

Análisis químico

El análisis químico del mineral, sin ningún tratamiento fuera de sedimentación y secado, se presenta en la tabla V. Coincide con los calculados de las arcillas originales cuando se corrigieron por sílice no combinada. Calculando sobre la base $0 + 0\text{H} = 24(-)$ se deriva la siguiente fórmula estructural:



En la capa tetrahédrica, substitución de Si^{4+} por Al^{3+} produce -0.45 cargas por celda, mientras que la octahédrica, con dos tercios de las posiciones ocupadas y deficiencias de 56 cargas, corresponde a una estructura dioctahédrica con -1.01 cargas que se balancean con $+1.01$ de los cationes intercambiables. Los iones intercambiables calculados coinciden con los analizados y, el H_2O^+ analizada, indica un exceso de 3.65 H_2O .

TABLA V

ANÁLISIS QUÍMICO DE IONES CALCULADOS
DE LA ARCILLA INTERESTRATIFICADA DE PATHÉ, HIDALGO

SiO ₂	56.30
Al ₂ O ₃	24.40
Fe ₂ O ₃	0.43
MgO	3.48
CaO	2.32
Na ₂ O	0.27
K ₂ O	0.12
H ₂ O+	12.66
Cationes intercambiables	
CaO	2.32
MgO	0.50
Na ₂ O	0.27
K ₂ O	0.11
Iones	
Si	7.55
Al	0.45
Al	3.40
Fe	0.04
Mg	0.56
Mg	0.13
Ca	0.33
Na	0.07
K	0.02
(OH)	4.00
H ₂ O	3.65

CONCLUSIONES

Los estudios anteriores indican que la arcilla estudiada es de estructura interestratificada, formada en la zona geotérmica de Pathé, Hidalgo, por alteración hidrotermal de rocas andesíticas bajo la acción de vapores a 150° y 2.77 Kg/cm⁻¹, con contenidos altos de Na⁺Cl⁻, SO₄⁼, SiO₄⁻⁴, CO₃⁼,

S⁼, Ca⁺⁺, etcétera, posiblemente de origen magmático y enriquecido a su paso por calizas, lavas y tobas riolíticas y andesíticas.

Las micrografías obtenidas indican que la arcilla considerada es monomineral, en delgados cristales de 0.2 micrones por 0.04, de fácil tendencia a enrollarse. Los registros de difracción de rayos X y la transformación unidimensional de Fourier corresponden a una estructura interestratificada de dos capas; una tipo montmorrillonita de 17.5-18A, con probabilidad de 0.48 y, una segunda, de 9A y posibilidad de 0.52 que pudiera corresponder a ilita. Según esto, el mineral sería un interestratificado ilita; montmorrillonita.

Absorción de radiación infrarroja mostró sustitución tetra y octahédrica, quedando por resolver que tan abundante podría ser ésta. El análisis químico, los iones y la fórmula estructural calculada indican el grado de sustitución, dejando Mg, Ca, K y Na interlamelares. Potasio total e intercambiable coinciden en un valor bajo, más propio de una montmorrillonita que de una ilita interestratificada. Simultáneamente, el H₂O+ medida es considerablemente mayor de lo común. Puede entonces admitirse que la interestratificación observada está probablemente asociada no a ilita sino a capas de agua interestratificadas con unidades de montmorrillonita. Si se admite un espesor del orden 3A para el agua, la estratificación sería entonces de 3 capas de agua (9A) por una de montmorrillonita dioctahédrica con probabilidad de 0.52 y 0.48 respectivamente. Otros autores (Hower y Mawatt, 1966; Ball, 1968) han admitido iones H₂O+ en posiciones interlamelares o moléculas de agua atrapadas en capas no expandibles.

Se concluye que la arcilla estudiada de Pathé, Hidalgo, corresponde a una estructura interestratificada de montmorrillonita dioctahédrica y capas de agua de 9A, con probabilidades de 0.48 y 0.52 respectivamente. El mineral difiere de los interestratificados ilita-montmorrillonita encontrados por Steiner (1968) en la zona geotérmica de Wairakei, Nueva Zelandia, la diferencia siendo probablemente debida al contenido alcalino de las rocas originales.

BIBLIOGRAFÍA

- ALONSO, H., DE ANDA, L. y MOOSER, F. (1964). Focos termales de la República Mexicana. Bol. Asoc. Mex. Geol. Petr. XVI (7,8), 145-151.
 BALL, D. F. (1968). Interstratified illitic clay in Ordovician ash from Comvay, North Wales, Clay Minerals 7(3), 363-366.
 BRINDLEY, G. W. (1956). Allevardite. Amer. Min. 41, 91-103.

- BYSTRÖN, A. M. (1954). Kinnekulle bentonite beds. *Sverig. geol. Unders., Arsbok* 48, Nº 5.
- COLE, W. F. y LANCUCKI, C. J. (1966). Tabular data of layer structure factors for clay minerals. *Acta Cryst.* 21,836-838.
- Comisión Federal de Electricidad (1968). Comunicación personal.
- DE ANDA, L. (1957). La geotermia en México. *Minería y Metalurgia* 1(2), 6-13.
- HAMILTON, J. D. (1957). Partially ordered mixed layer mica-montmorillonite from Maitland, New South Wales. *Clay Minerals* 7,63-78.
- HENDRICKS, S. B. y TELLER, E. (1942). X-ray interference in partially ordered layer lattices. *J. Chem. Phys.* 10,147-167.
- HEYSTEK, K. (1954). Regular mixed layer clay. *Miner. Mag.* 30,400-408.
- HOWER, J. y MOWATT, T. C. (1966). The mineralogy of illites and mixed layer illite/montmorillonites. *Amer. Miner.* 51,825-854.
- KASPER, J. S., y LONSDALE, K. (1967). *International Tables for X-ray Crystallography*. The Kynoch Press, Birmingham, Inglaterra. 2nd. Ed. Vol. II, pp. 270-271.
- MACÉWAN, D. M. C. (1956a). Illite-montmorillonite. *Clays and clay minerals*. Publ. 456, Nat. Acad. Sci. Washington. A. Swineford, Editor. Pag. 166-172.
- (1956b). Fourier transform methods for studying scattering from lamellar systems. I. A direct method for analysing interstratified mixtures. *Kolloid Zeitschrift* 149,96-108.
- (1958). Fourier transform methods. II. Calculation of diffraction effects for different types of interstratification. *Kolloidzshr.* 156,61-67.
- MOOSER, F. (1964). Provincias geotérmicas de México. *Bol. Asoc. Mex. Geol. Petr.* XVI (7,8), 153.
- (1966). Geología del campo de Pathé. Comisión Federal de Electricidad, México. Comunicación personal.
- SATO, M., AINUMA, K., y KAZUO, K. (1965). *Nature, Lond.* 208, 179.
- STEINER, A. (1968). Clay minerals in hydrothermally altered rocks at Wairakei, New Zeland. *Clays and Clay Minerals* 16 (3), 193-214.
- STUBICAN, V. y ROY, R. (1961a). Isomorphous substitution and infrared spectra of the layer lattice silicates. *Amer. Miner.* 46, 32-51.
- (1961b). A new approach to assignment of infrared absorption bands in layer structure silicates. *Zeit. Kristallographie* 115, 200-14.
- (1961c). Infrared spectra of layer structure silicates. *Jour. Amer. Cer. Soc.* 44, 625-27.

LA CELDA REDUCIDA

Programas de cálculo cristalográfico