



“FIBRO-PALAGONITA” EN BASALTOS DEL COMPLEJO VOLCANICO TRONADOR (CVT), ANDES SUR (41°S), CHILE

MELLA, M.¹, MUÑOZ, J.², VERGARA, M.¹, BELMAR, M.¹

¹Departamento de Geología, Universidad de Chile, Casilla 13518, Correo 21, Santiago, Chile, mauromella@esfera.cl, mariover@cec.uchile.cl, mbelmar@cec.uchile.cl.

²Servicio Nacional de Geología y Minería, Oficina Técnica Puerto Varas, La Paz 406, Puerto Varas, Chile, jmunoz@sernageomin.cl

INTRODUCCION

En ambientes dominados por glaciares y volcanismo, es común encontrar texturas que reflejan interacción magma-agua. El volcán Tronador, ubicado en la frontera con Argentina a los 41°11' de latitud sur, alberga un gran glaciar en su cima y presenta actividad en gran parte del Pleistoceno (Mella *et al.*, en prensa). Este estratovolcán presenta una gama de depósitos y productos asociados a la interacción agua-magma y vidrio-agua, destacando la presencia de palagonita en los basaltos.

En la literatura, la palagonita es descrita como el primer producto estable de alteración del vidrio básico, sideromelano (Stroncik y Schmincke, 2002; Peacock, 1926; Thorseth *et al.* 1991). Peacock (1926) diferenció dos formas de palagonita, una amorfa que llamó “gel-palagonita” y otra cristalina que llamó “fibro-palagonita”. Posteriormente, Stroncik y Schmincke (2001) definieron que estas “palagonitas” eran distintos grados de alteración, de tal modo que el estado inicial es amorfo (palagonita *sensu stricto*) y el más avanzado cristalino “fibro-palagonita”.

En el presente trabajo se abordó el estudio de la “fibro-palagonita” en basaltos con indicios de interacción no explosiva de agua-magma. Se utiliza el término “fibro-palagonita” como un estado intermedio de evolución en la alteración de baja temperatura del sideromelano, que se inicia con una sustancia amorfa (“gel-palagonita”) y culmina con cristalinas (esmetitas) (Stroncik y Schmincke, 2002).

MINERALOGIA

Diversos autores han investigado los componentes mineralógicos de la palagonita, aceptándose como una mezcla de diferentes arcillas, ceolitas, y óxidos de hierro (Jercinovic *et al.*, 1990). Zhou *et al.* (1992) y posteriormente Stroncik y Schmincke (2001, 2002), obtuvieron similares resultados encontrando que la palagonita se componía de esmetitas y postularon que era una mezcla de cristales de nontronita y saponita, producto la evolución de una palagonita amorfa. En resumen, diversos autores concuerdan que la palagonita es una mezcla de esmetitas, con pequeñas porciones de óxidos de Fe, ceolitas y hasta apatito (Eggeleton y Keller, 1982; Jercinovic *et al.*, 1990; Stroncik y Schmincke, 2001, 2002).

MICROANÁLISIS QUÍMICOS

Los microanálisis químicos e imágenes de minerales fueron obtenidos utilizando la SEM-Probe, CAMEBAX SU-30, del Laboratorio de Microscopia Electrónica del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Todos los elementos fueron medidos usando espectrometría por dispersión de longitud de onda de rayos-X, (WDS). Análisis cuantitativo con software cameca SX-50, corrección PAP, utilizando una corriente de 10nA, con aceleración de voltaje de 15 kV y un tiempo de conteo de 10 s. El rayo enfocado en un punto de tamaño 2 μm , en algunos casos se utilizó un rayo de 10 μm para minimizar la evaporación de elementos livianos. En la siguiente tabla, se muestran los diferentes estándares utilizados y sus respectivos errores en porcentaje en peso.

Elemento	Cristal	Estándar	Wt% err
Si	TAP	Wollastonita	$\pm 0,046$
Al	TAP	Ortoclasa	$\pm 0,041$
Mg	TAP	Diopsido	$\pm 0,146$
Na	TAP	Albita	$\pm 0,113$
K	PET	Ortoclasa	$\pm 0,150$
Ca	PET	Wollastonita	$\pm 0,084$
Mn	PET	Rodonita	$\pm 0,088$
Ti	LIF	Rutilo	$\pm 0,133$
Fe	LIF	Andradita	$\pm 0,108$

La certificación de los estándares es entregada por P&H Developments quienes han verificado la alta pureza de los compuestos sintéticos y naturales por medio de rigurosos microanálisis.

RESULTADOS

Los basaltos analizados pertenecen a la subunidad Tronador III del volcán Tronador (Mella *et al.*, en prensa). La "fibro-palagonita" se observó como un material translucido de color pardo-amarillento, anisótropo, colores de interferencia de primer a segundo orden y hábito fibroso (Figura 1a y b); encontrándose en pequeños intersticios entre minerales de la masa fundamental (asociados a relictos de vidrio) y rellenando parcialmente vesículas (Figura 1a y b).

Las observaciones realizadas en el microscopio electrónico, muestran pequeñas porciones de apatito (Figura 2) y óxidos de hierro (Figura 3) asociados a la "fibro-palagonita". Además, se aprecian formas muy semejantes a las descritas por Stroncik y Schmincke (2002) y Güven (1988).

Los análisis realizados en microsonda, muestran que los óxidos principales en la "fibro-palagonita" son: SiO_2 (39,1-48,7 Wt%), MgO (8,3-17,1 Wt%), FeO (12 - 23 Wt%) y Al_2O_3 (0,28-11,63 Wt%) (ver tabla 1). Entre los otros elementos mayores, se destacan cantidades variables de P_2O_5 (0,0-1,2 %), CaO (0,8-5,8 Wt%) y K_2O (0,2-0,9 Wt%). La mayor parte de los análisis de sodio se encuentra en el rango del error de medición (0.113 Wt%).

La suma de los cationes de Al^{+3} y Si^{+4} es mayor o igual a 4 (Figura 6) y es notable la correlación negativa entre el Mg^{+2} y Fe^{+2} (Figura 7) en la muestra XB29, entregando los parámetros estadísticos de: $r = -0.961$; $r^2 = 0.92$; $r^2 = 0.933$; $(x,0) = 3.2$; $(0,y) = 2.56$, con $y = \text{Mg}^{+2}$ y $x = \text{Fe}^{+2}$.

Tabla 1: Análisis de fibro-palagonita

muestra	XB29 (Tronador III)														XM10 (Tronador III)			
N°	4	5	11	22	16	1	21	15	16	23	16	34	25	44	43	47	49	
%Peso																		
SiO2	48.59	46.56	48.68	47.59	43.74	45.03	44.29	44.02	43.74	49.54	39.10	46.70	48.99	44.49	47.23	43.62	46.15	
TiO2	0.07	0.17	0.10	0.20	0.15				0.15		0.05	0.20	0.05		0.30	0.36	0.336	
Al2O3	5.71	7.66	5.39	4.12	4.71	4.56	4.67	4.32	4.71	0.31	3.75	2.82	0.28	8.82	8.28	9.19	11.63	
FeO	22.95	21.40	17.92	15.99	18.68	19.18	21.14	20.63	18.68	12.41	15.96	20.53	12.30	13.18	15.01	13.21	11.94	
MnO	0.20	0.26	0.12	0.13	0.50	0.20	0.16	0.36	0.50	0.45	0.19	0.71	0.20		0.09	0.11	0.166	
MgO	9.55	11.41	14.21	14.95	11.98	12.68	11.86	11.33	11.98	16.89	10.76	9.23	17.08	9.68	11.51	8.73	8.323	
CaO	4.09	3.52	2.67	2.75	0.86	3.09	2.63	1.25	0.86	1.01	0.78	2.35	0.82	3.37	2.86	4.67	5.791	
Na2O	0.12	0.10	0.10	0.07	0.07	0.10	0.15	0.04	0.07	0.11	0.02	0.23	0.15	0.58	0.35	0.43	0.829	
K2O	0.84	0.82	0.49	0.40	0.27	0.26	0.93	0.43	0.27	0.50	0.20	0.87	0.74	0.37	0.41	0.36	0.395	
P2O5	0.99	1.03	0.72	1.14	0.28	0.52	1.15	0.54	0.28	0.23		0.04	0.27	0.04	0.30	0.07	0.013	
Total	93.12	92.93	90.40	87.33	81.25	85.62	86.99	82.93	81.25	81.44	70.80	83.68	80.87	80.53	86.34	80.73	85.57	
Si	3.61	3.45	3.62	3.63	3.65	3.59	3.52	3.64	3.65	3.96	3.73	3.84	3.95	3.64	3.62	3.58	3.55	
Al	0.50	0.67	0.47	0.37	0.46	0.43	0.44	0.42	0.46	0.03	0.42	0.27	0.03	0.85	0.75	0.89	1.05	
Ti	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	
Fe	1.43	1.32	1.11	1.02	1.30	1.28	1.41	1.43	1.30	0.83	1.27	1.41	0.83	0.90	0.96	0.91	0.77	
Mn	0.01	0.02	0.01	0.01	0.04	0.01	0.01	0.03	0.04	0.03	0.02	0.05	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	
Mg	1.06	1.26	1.57	1.70	1.49	1.51	1.41	1.40	1.49	2.01	1.53	1.13	2.05	1.18	1.31	1.07	0.95	
Ca	0.33	0.28	0.21	0.22	0.08	0.26	0.22	0.11	0.08	0.09	0.08	0.21	0.07	0.30	0.23	0.41	0.48	
Na	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.00	0.04	0.02	0.09	0.05	0.07	0.12	
K	0.08	0.08	0.05	0.04	0.03	0.03	0.09	0.04	0.03	0.05	0.02	0.09	0.08	0.04	0.04	0.04	0.04	
P	0.06	0.06	0.04	0.07	0.02	0.03	0.08	0.04	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	
Total	21.34	21.76	21.51	21.21	21.71	21.56	21.51	21.59	21.71	20.94	21.68	21.25	20.97	21.90	21.77	21.83	21.98	
#Mg	0.43	0.49	0.59	0.63	0.53	0.54	0.50	0.49	0.53	0.71	0.55	0.45	0.71	0.57	0.58	0.54	0.55	

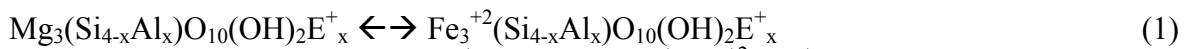
Número de cationes obtenidos a partir de 11 oxígenos, siguiendo ecuaciones de esmectitas sugeridas por Güven (1988)

DISCUSION

Las observaciones realizadas por microscopía óptica y electrónica, muestra a la "fibro-palagonita" como un agregado de minerales de esmectitas de hábito fibroso, posiblemente correspondiente a una beidellita, nontronita y/o saponita (Deer *et al.*, 1993; Schiffman, 1991), con pequeñas cantidades de óxidos de Fe y apatito (Figuras 2 y 3). Explicando los niveles anómalos de Ca⁺² y P⁺⁵ en los análisis.

Todos los datos obtenidos caen en el campo de las esmectitas (Figura 4), coincidentes con datos de Schiffman (1991). La "fibro-palagonita" de la muestra XB29 cae en el campo de la saponita (Schiffman, 1991, Figura 5), reflejando un comportamiento trioctahédrica de la esmectita. En cambio, la "fibro-palagonita" de la muestra XM10, presenta un comportamiento hacia la serie saponita-beidellita (Schiffman, 1991, Figura 5) y la suma siempre mayor a dos de los cationes octaédricos la ubicaría en una mezcla de esmectita dioctaédrica-trioctaédrica.

Por otro lado, la estrecha correlación negativa entre el Mg²⁺ y Fe²⁺ en la muestra XB29, permite inferir que estos elementos se comportan como sustitución en una misma estructura química como solución sólida. En las esmectitas se presenta dicha solución en el grupo de las esmectitas ferromagnesianas trioctaédricas (Güven, 1988). Según Güven (1988), este grupo de esmectitas forma una solución sólida representada por Mg/Fe y propone una formula general que va desde un miembro magnesiano (Saponita) a uno ferroso (Saponita ferrosa) representado por la ec.1,

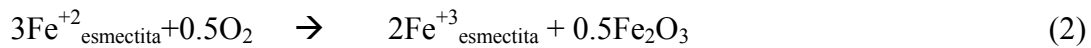


donde el valor x es menor a 0,6 y E_x⁺ pueden ser K⁺, Ca⁺², Na⁺.

Un problema de la espectrometría por dispersión de longitud de onda de rayos-X (WDS), es que entrega el Fe como FeO, siendo imposible determinar el contenido de hierro férrico, generando pequeñas distorsiones en los análisis y entregando menor Fe^{+2} que el requerido para la fórmula de la saponita (ecuación 1).

Dado que el Fe y Mg están relacionados, fue posible inferir el contenido de férrico con un balance. Para ello se hacen algunos supuestos:

- La recta de regresión extrapolada en los valores de Mg=0 y Fe=0 da valores de $Mg_{Fe=0}^{+2}=3.108$ (concordante con el "end member" Mg de la ecuación 1, Figura7) y $Fe_{Mg=0}^{+2}=2.56$, se asume que el valor menor a 3 del "end member" de ferroso es por perdida debido a su oxidación a férrico como Fe_2O_3 (ecuación 2, Güven, 1988).



- Se tomó la relación de $Fe^{+2} / Fe^{+3} = 1,5$ propuesta por Kodama *et al.* (1988) para calcular la perdida de hierro ferroso por oxidación de la Saponita.
- Se asume que todo el hierro ferroso entra en la ecuación 1 como "end-member" igual a 3.

Con los supuestos anteriores se puede generar la ecuación 3.

$$Fe^{+2}_{Mg=0} + Fe^{+3} \times 1,5 = 3 \quad (3)$$

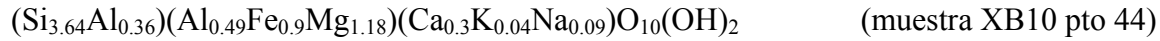
Desarrollando, obtenemos que la cantidad estimada de Fe^{+3} por oxidación de Fe^{+2} en el "end member" $Fe_3^{+2}(Si_{4-x}Al_x)O_{10}(OH)_2E^+_x$ es 0.32.

De este modo se puede explicar el déficit de hierro ferroso ($Fe_{Mg=0}=2.46$) por la oxidación a hierro férrico y apoyar la apreciación petrográfica de la existencia de óxidos de Fe en la "fibro-palagonita". Explicando, a la vez, la no coincidencia exacta de los análisis dentro de las fórmulas de Güven (1988).

El desequilibrio de cargas, en las fórmulas de la esmeclita visto en algunos análisis, así como los niveles altos de calcio y potasio, se explican por la existencia de más de un mineral (apatito, óxidos de Fe) y por la oxidación del Fe^{+2} en la "fibro-palagonita". Se hace necesario otras técnicas que analicen el Fe^{+3} directamente desde la muestra, para sustentar totalmente esta discusión.

La "fibro-palagonita" de muestra XM10 presenta mayores niveles de aluminio, cae en el campo de la saponita - beidellita (Schiffman, 1991, Figura 5) y no presenta una relación Mg^{+2} y Fe^{+2} inversa como la de la muestra XB29 (Figura 7), no entregando claridad en su clasificación octaédrica o tetraédrica. Por ello, se propone una clasificación en base al aluminio octaédrico versus la suma de los cationes octaédricos, definiendo un campo de arcillas dioctaédricas (montmorillonita, beidellita, notronita; Deer *et al.*, 1993) y de trioctaédricas (saponita y vermiculita, Deer *et al.*, 1993) (Figura 8). Según esta clasificación, las muestras XB29 cae en la zona trioctaédrica de las saponitas y la muestra XM10 en la zona de mezcla de esmeclita dioctaédrica –trioctaédrica, corroborando los diagramas de Shiffman (1991).

Realizando un balance de cargas se han obtenido dos fórmulas tipo para las esmectitas de la muestra XB29 y XB10, se han elegido dos muestras sin desequilibrio de cargas, estas corresponden a los puntos 34 y 44 respectivamente.



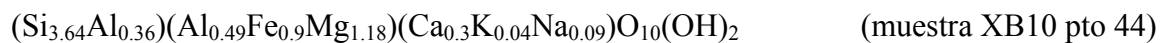
Aunque no es posible dilucidar con esta técnica la estructura de esmectitas ferromagnesianas trioctaédricas. La esmectita vista en la muestra XB29 se encontraría en un término intermedio de la solución sólida de la ecuación 1 con Mg/Fe ≈ 1 de las saponitas y la vista en la muestra XM10, se encontraría asociada a la estructura de mezcla de esmectita dioctaédrica-tetraédrica (Schiffman, 1991) o que presentan un carácter di-trioctaédrico (Güven, 1988), sin encontrar en la literatura fórmulas similares.

CONCLUSIONES

Los antecedentes microscópicos y químicos, permiten inferir que la "fibro-palagonita" en basaltos del volcán Tronador, es una mezcla de minerales, con un alto porcentaje de esmectita trioctaédrica ferromagnesianas del tipo saponita, esmectitas di-trioctaédrica (Güven, 1988) y pequeños aportes de apatito y óxidos de Fe (Figura 4 y Figura 5). Dicha apreciación se encuentra en concordancia con otros autores (Peacock, 1926; Stroncik y Schmincke, 2002).

Se propone una clasificación en base al aluminio octaédrico versus la suma de los cationes octaédrico, definiendo el campo para las esmectita octaédrica y las esmectitas dioctaédricas (Figura 8). Según esta clasificación, todas las muestras de XB29 caen en el campo trioctaédrico y las correspondiente a XM10, con mayor aluminio octaédrico, cae en el campo de mezcla de esmectitas trioctaédricas-dioctaédricas (Schiffman, 1991), o más bien, en las esmectitas que presentan un carácter di-trioctaédrico (Güven, 1988).

La Saponita encontrada en la muestra XB29, presenta características intermedias (Mg/Fe ≈ 1) de una solución sólida entre Mg—Fe. Para la saponita de la muestra XB29 y la esmectita di-trioctaédrica XM10, no se encontró una fórmula similar en la literatura (ej. Güven, 1988; Deer *et al.*, 1993). La fórmula representativas de ambas muestras son:



AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en una tesis de Magíster sobre la petrología del Complejo Volcánico Tronador, desarrollada por el primer autor. Se financia con la beca de exención de arancel del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, por la Oficina Técnica Puerto Varas del Servicio Nacional de Geología y Minería y por la Cofradía del Lago de Todos los Santos. Se agradece al Doctor Luis Aguirre L. por sus consejos y discusión.

REFERENCIAS

- Deer, W.A., Howie, R.A. y Zussman, J. 1993. *An Introduction to the Rock-Forming Minerals*. Longman Scientific & Technical. 696 pp. New York.
- Edgecombe RA y Keller, J. 1982. The palagonitization of limburgite glass- a TEM study. *Neues Jahrb Miner*. Vol 7. p 321-336.
- Güven, N., 1988. Smectites. In *Hydrous Phyllosilicates, Review in Mineralogy*, Min. So. America, 497-552.
- Jercinovic, M.J., Keil, K. y SNT M.R. Schmitt RA. 1990. Alteration of basaltic glasses from north-central British Columbia, Canada. *Geochim. Cosmochim Acta*. Vol 54. p 2679-2696.
- Kodama, H., De Kimpe, C. R. y Dejous, J. 1988. Ferrian saponite in a gabbro saponite at Mount Megantic. *Clay and clay Minerals*. Vol. 36. p 102-110.
- Mella, M.; Muñoz, J.; Vergara, M. y Stern, C. 2003, The Tronador Volcanic Complex: a Pleistocene calcalkaline to tholeiitic arc volcanism in the Southern Andes. X SAGGI. in press.
- Peacock, M.A. 1926. The petrology of Iceland, part I. The basic Tuff. *Royal Society Edinburgh. Transaction*. Vol. 55. p. 53-76.
- Shiffman, P. y Fridleifsson, G.O. 1991. The smectite-clorite transition in drillhole NJ-15, Nesjavellir geothermal field, Iceland: XRD, BSE and electron microprobe investigations. *J. Metamorphic Geol*. Vol. 9. P. 679-696.
- Stroncik, N. y Schmincke, H-U. 2002. Palagonite – a review. *Int J Earth Sci*. Vol. 91.p. 680-697.
- Stroncik, N. y Schmincke, H-U. 2001. The evolution of the Palagonite crystallization, chemical changes and element budget. *G-cubed 2*.
- Thorseth, IH., Furnes, H. y Tumyr, O. 1991. An textural and chemical study of Icelandic palagonite of varied composition and its bearing on mechanism of the glass-palagonite transformation. *Geochem. Cosmochim Acta*. Vol. 55. P. 731-749.
- Zhou, Z. Fyfe, W.S., Tazaki K. y Vandergaast, SJ. 1992. The structural characteristics of palagonite from DSDP site-335. *Can. Mineral*. Vol. 30. p 75-81.

FIGURAS

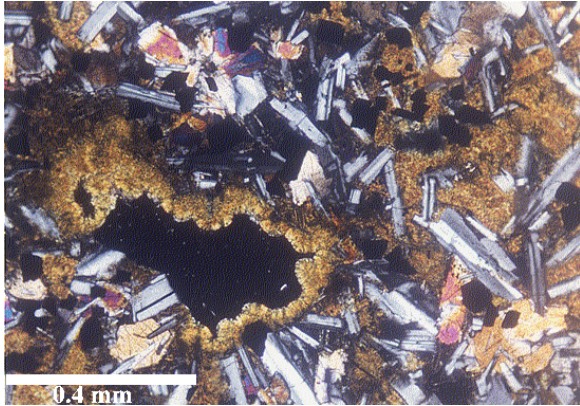


Figura 1a: Microfotografía de fibro-palagonita en muestra XB29. Nicoles cruzados.

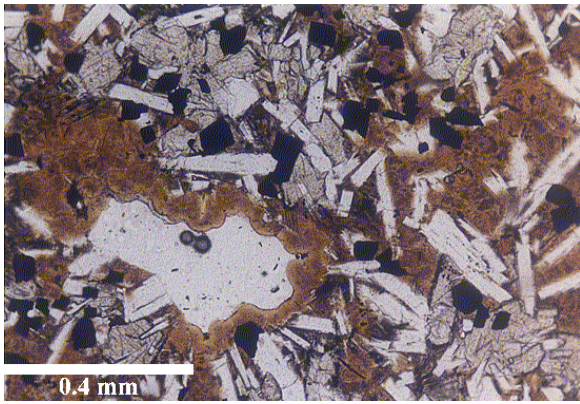


Figura 1b: Microfotografía de fibro-palagonita en muestra XB29. Nicoles paralelos.

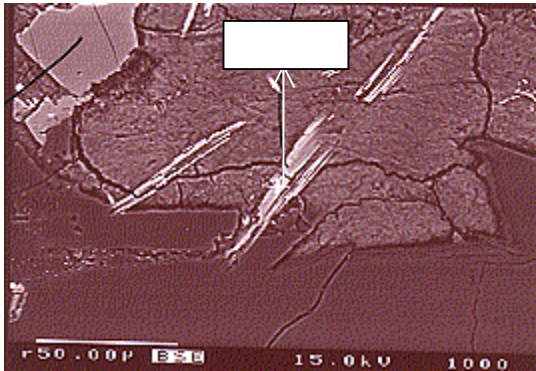


Figura 2: Imagen en detalle de electrones retrodispersados (BSE) de la muestra XB29 mostrando Apatito en Saponita.

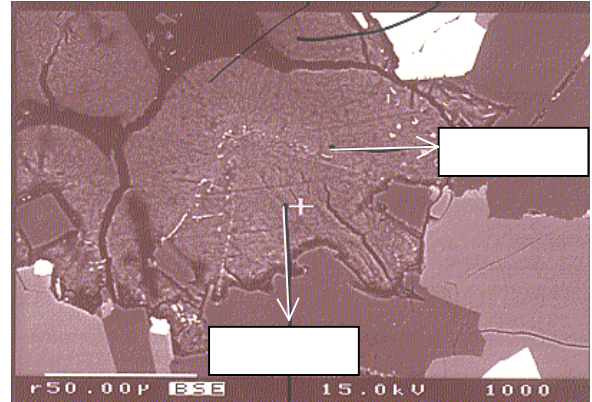


Figura 3: Imagen en detalle de electrones retrodispersados (BSE) de la muestra XB29 mostrando Oxidos de Fe en Saponita.

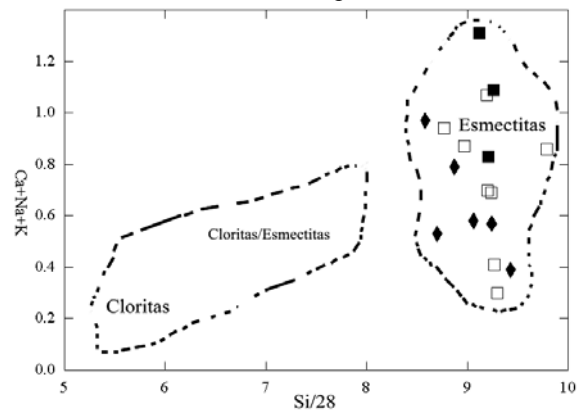


Figura 4: suma de los cationes interfoliares versus Si total. Todos los análisis recalculados según 28 oxígenos. ■ :XM10 ; □ : XB29; ◆ : mezcla entre esmectitas trioctaédricas y dioctaédricas (Schiffman, 1991). Modificado desde Schiffman (1991)

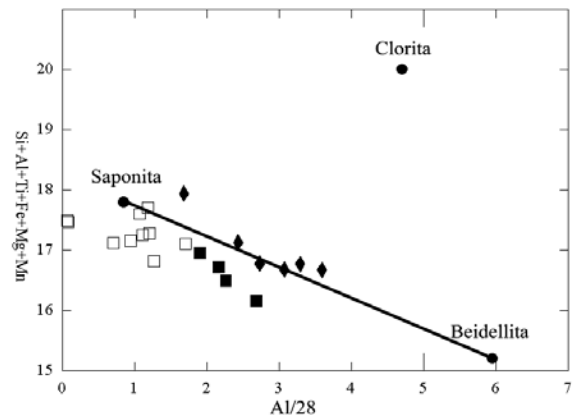


Figura 5: suma de los cationes no-interfoliares versus Al total. Todos los análisis recalculados según 28 oxígenos. ■ :XM10 ; □ : XB29; ◆ : mezcla entre esmectitas trioctaédricas y dioctaédricas (Schiffman, 1991). Modificado desde Schiffman (1991)

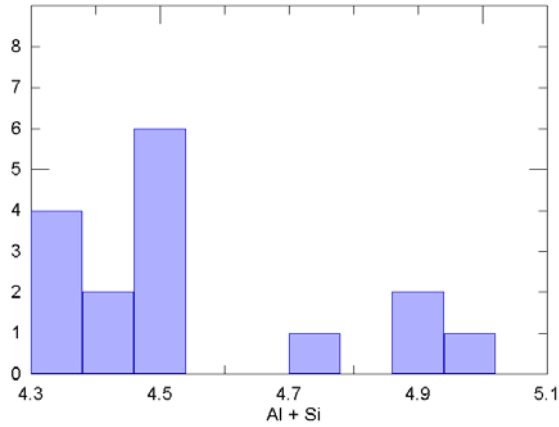


Figura 6: Frecuencia de muestras analizadas, todas muestran Al + Si \geq 4.

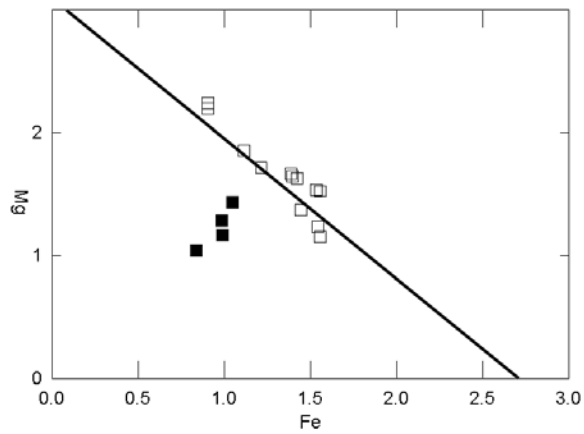


Figura 7: correlación entre Mg y Fe. ■:XM10;□:XB29. Todos los valores obtenidos en base a 11 oxígenos.

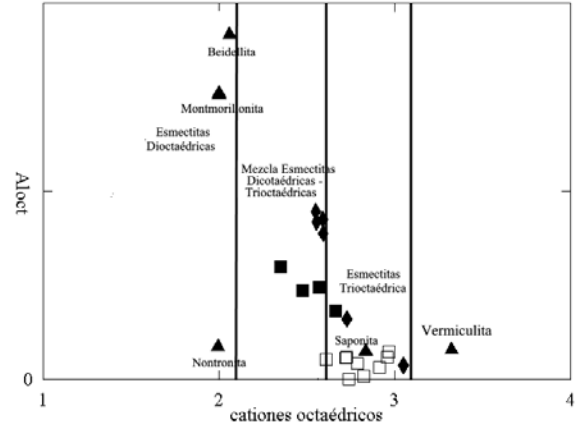


Figura 8: Esmeectitas trioctaédricas y dioctaédricas. Triángulos rellenos: esmeectitas y vermiculitas obtenidos desde Deer *et al.* (1993); ■ :XM10 ; □ :XB29; ◆: mezcla entre esmeectitas trioctaédricas y dioctaédricas (Schiffman, 1991). Todos los valores obtenidos en base a 11 oxígenos.