

Estudio mediante rayos X de las maclas de la microclina.

por M. C. TOMILLO y J. SOLANS HUGUET

Departamento de Cristalografía y Mineralogía. Universidad de Oviedo.

RESUMÉ

On fait l'étude théorique et expérimentale de la diffraction des rayons X pour maclés de la microcline. On compare les résultats obtenus, en orientant différemment les cristaux aux rayons X. La méthode permet différencier les feldspaths potassiques d'après leurs conditions de formation.

RESUMEN

Se efectúa un estudio teórico y experimental de la difracción de rayos X por maclas de microclina. Se comparan los resultados al orientar de distintas maneras los cristales. Se llega a la conclusión de que el método permite la diferenciación de los feldespatos potásicos según su modo de formación.

La presencia de maclas en los feldespatos y en especial en aquellos que presentan simetría triclinica, plantea una problemática no totalmente resuelta. La elevada frecuencia de aparición de maclas en los individuos de estos minerales puede suministrar una información, que se ha usado en el método de Michel Levy para la identificación del mineral, o se ha relacionado con el proceso de formación como puede verse en los estudios de Gorai (1951).

La técnica usual del estudio de las maclas de los feldespatos es la observación mediante el microscopio de polarización y platina teodolítica, pero desde el trabajo de Laves (1950) se usan asimismo las técnicas de difracción de rayos X. El presente trabajo efectúa el estudio de los diagramas de difracción de cristal oscilante de una serie de muestras de feldespato clasificado como microclina en observación visual. Estas muestras proceden del Noroeste de España, pero se han añadido algunas de otras procedencias y con fines comparativos dos de origen extranjero: una sanidina de Drachenfels (Renania) y una amazonita de São Miguel de Piracaciba (Minas Gerais). Se pretende comparar diversas modalidades en la obtención del diagrama y efectuar una prospección de las posibilidades del método.

TEORÍA

Existe una abundante bibliografía sobre las maclas presentes en los feldespatos, siendo las principales referencias las de Duparc y Reinhard (1923), Burri (1962) y Smith (1974).

Gorai (1951) clasifica las maclas de los feldespatos según

su distribución en las rocas en dos grupos, llamando tipo A, al formado por las leyes de la albita y de la periclina, y tipo C al de las restantes leyes conocidas. El primer grupo se caracteriza porque la macla no modifica la topología de la red tridimensional de tectosilicato a diferencia de las maclas C en las que existe modificación topológica. Este hecho lleva como resultado que las maclas tipo A se produzcan con mayor facilidad y aparezcan como maclas polisintéticas. Por otro lado dadas sus leyes de macla son posibles sólo en estructuras triclinicas. Finalmente, dadas sus características son las maclas de tipo A las que se detectarán fácilmente mediante los fenómenos de difracción de rayos X.

Dado que el concepto de red recíproca permite interceptar de modo fácil las placas en las que se ha registrado un diagrama de difracción de rayos X, es este concepto el que usamos en el estudio teórico siguiente. Esta red recíproca queda definida como el grupo de vectores $g(hkl)$ que derivan de la red cristalina mediante las relaciones:

$$g_i \cdot a_j = 0 \quad , \quad g_i \cdot a_i = 1$$

siendo g_i los vectores fundamentales de la red recíproca y a_i los vectores fundamentales de la red cristalina.

La presencia de la macla genera un nuevo conjunto de vectores de la red recíproca $g'(hkl)$ siendo la relación entre ambos:

$$g'(hkl) = M \cdot g(hkl)$$

siendo M el operador de simetría responsable de la macla y que queda definido por la ley de macla. Dada la simetría triclinica de la red recíproca de los feldespatos considerados usamos unos ejes cartesianos de referencia, indicándose en la tabla 1 la transformación existente para cada componente de un vector de la red recíproca $g(hkl)$ referida a dichos ejes ortogonales.

Se indican en dicha tabla dos orientaciones. La primera corresponde a que el tercer eje ortogonal coincide con g_3 y el plano definido por el primer y tercer eje corresponde al plano definido por g_1 y g_3 . La segunda orientación se caracteriza por que el plano del primer y segundo ejes ortogonales es el plano definido por g_1 y g_2 coincidiendo este vector con el segundo eje.

Los nudos de la red recíproca $g(hkl)$ y $g'(hkl)$ relacionados por la macla definen un vector τ que caracteriza la macla y cuyas proyecciones pueden medirse en las placas de registro de los diagramas de difracción. Se cumple que:

$$\tau(hkl) = g(hkl) - g'(hkl) = \{M - E\} \cdot g(hkl)$$

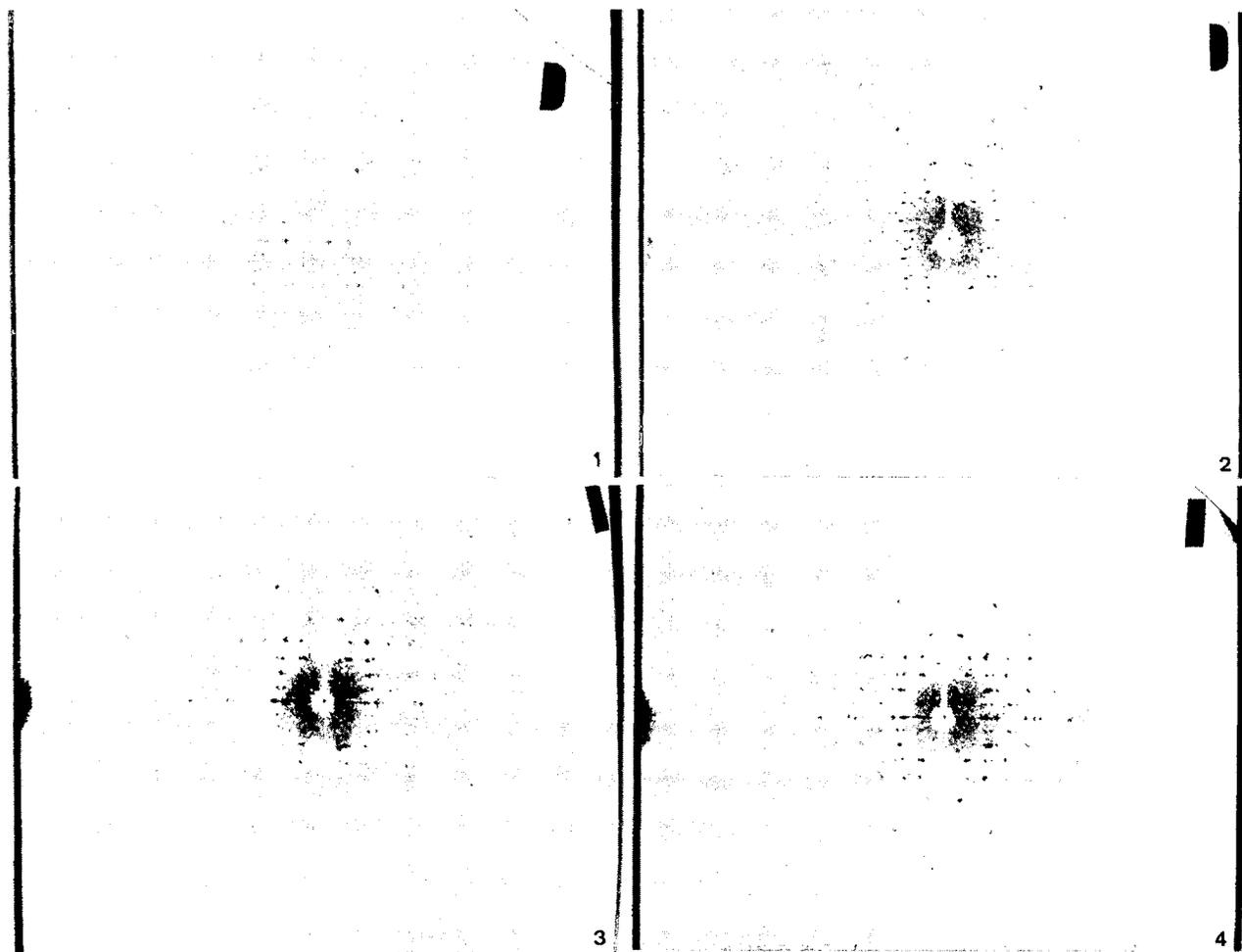


Fig. 1. Amazonita (Minas Gerais). Orientación según 010. Asociación M.
 Fig. 2. Amazonita (Minas Gerais). Orientación según la perpendicular a (001). Asociación M.
 Fig. 3. Microperitita en pegmatita (Montseny, Gerona). Orientación según 010. Macla según la ley de la albita tanto en la microclina como en la albita.
 Fig. 4. Microperitita en paragneis (Porto, Zamora). Orientación según 010. Asociación D.

siendo E el operador identidad. El valor y dirección de este vector pueden obtenerse a partir de los datos de la tabla 1.

En la ley de la albita actúa de plano de simetría el plano (010) por lo que en la red recíproca el elemento de simetría es el plano perpendicular a g_2 , lo que corresponde a la orientación II citada; la simetría de la macla puede describirse por Cm' . Por ello el vector característico de la macla será:

$$\tau_a = \begin{pmatrix} 0 \\ 2hg_1 \cos \gamma + 2lg_3 \sin \varnothing \cos \psi \\ 0 \end{pmatrix}$$

Este vector es por lo tanto paralelo a la línea de nudos (0k0) de la red recíproca y su módulo es para cualquier valor de (hkl) siempre distinto de cero.

En la macla con la ley de la periclina, los dos individuos se relacionan por un giro de 180° alrededor de [010] siendo la simetría del conjunto por lo tanto $C2'$; en la red recíproca se produce por lo tanto un giro sobre la normal al plano definido por g_1 y g_3 , lo que corresponde a la orientación I citada anteriormente. El vector característico será pues:

$$\tau_p = \begin{pmatrix} 2 kg_2 \sin \alpha \cos \gamma' \\ 0 \\ 2kg_2 \cos \alpha \end{pmatrix}$$

Este vector es por lo tanto paralelo a la línea de nudos (0k0) de la red recíproca y su módulo es para cualquier valor de que para todos los nudos (hol) el módulo es cero.

Se conoce una combinación de cristales de feldespato a la que MacKenzie y Smith (1955) denominan asociación diagonal o asociación D. Para Brown, Willaime y Guillemin (1972) se trata de una macla de ley albita distorsionada por la presencia de una segunda fase que asimismo presenta la ley de la albita. El vector correspondiente está relacionado con la ley albita por:

$$\tau_d = D \cdot \tau_a$$

siendo D el operador de distorsión. Esta distorsión es variable pues se conocen casos con valores muy pequeños en los que la asociación diagonal se confunde con una macla albita, mientras que en otros casos los nudos de la red recíproca ocupan posiciones próximas a las correspondientes a la macla de la periclina.

Un segundo problema a estudiar es la posibilidad de existencia de ambas leyes de modo simultáneo. En este caso deben distinguirse dos posibilidades:

- que la combinación de maclas albíta más periclina proceda de una transformación polimorfa con una transición entre una fase monoclinica y una fase triclinica.
- que la combinación de ambas maclas sea el resultado de un proceso dentro de la fase triclinica y por lo tanto en un ambiente con esta simetría.

Ambos casos se conocen y se les ha dado nombres de asociación M, en el primer caso y asociación T en el segundo.

En la asociación M la transformación polimorfa provoca la aparición de dominios de distinta orientación y a partir de ellos la aparición de ambas leyes de macla. La simetría del conjunto es $C 2'/m'$ y por lo tanto los elementos de simetría de la fase monoclinica pasan a ser los elementos de simetría de la macla.

Los dominios de distinta orientación corresponden a las orientaciones I y II. En la asociación M pueden medirse cuatro vectores distintos, dos de ellos son los ya descritos τ_a y τ_p al hablar de las maclas albíta y periclina, los dos restantes relacionan un nudo de la macla albíta con un nudo de la macla periclina.

$$\tau_m = \begin{pmatrix} hg_1(\sin \beta - \sin \gamma) \llcorner kg_2 \sin \alpha \cos \gamma' - lg_3 \sin \emptyset \sin \psi \\ - hg_1 \cos \gamma + kg_2(\sin \alpha \sin \gamma' - 1) - lg_3 \sin \emptyset \cos \psi \\ hg_1 \cos \beta + kg_2 \cos \alpha + lg_3(1 - \cos \emptyset) \end{pmatrix}$$

$$\cong \begin{pmatrix} kg_2 \sin \alpha \cos \gamma' - lg_3 \sin \emptyset \sin \psi \\ - hg_1 \cos \gamma - lg_3 \sin \emptyset \cos \psi \\ hg_1 \cos \beta + kg_2 \cos \alpha \end{pmatrix}$$

Estos dos vectores quedan inclinados con respecto a los vectores $g(h00)$, $g(0k0)$ y $g(00l)$ por lo que en las placas de registro la asociación M se reconoce por los grupos de cuatro puntos formando un rombo.

En la asociación T, como la combinación de ambas maclas se produce con una simetría triclinica los elementos de simetría plano (010) y eje {010} no son perpendiculares, por ello sólo aparecen en el diagrama de difracción grupos de tres nudos cuyos vectores son τ_a y τ_i , siendo este último el deducido para la macla de la periclina a partir de la segunda orientación.

$$\tau_i \cong \begin{pmatrix} kg_2 \sin \theta \sin \mu \\ 0 \\ kg_2 \cos \theta \end{pmatrix}$$

El diagrama de difracción que se obtiene en los cristales maclados puede quedar modificado por la aparición de detalles debidos a fenómenos complementarios. Entre estos son frecuentes los siguientes:

- Periodicidad en las maclas polisintéticas. El esquema propuesto corresponde a la existencia de dos individuos maclados o al caso, reducible al anterior de una macla polisintética con una distribución aleatoria de los espesores de los individuos que forman la macla. Si las juntas de macla se repiten de modo periódico se producirá la difracción por la estructura periódica así generada y en el caso límite nos encontramos frente a un ejemplo de politipismo. Por ello en este caso las manchas de difracción iniciales vendrán acompañadas de otras próximas de superestructura, siendo la

Tabla 1

Transformación de los componentes de un vector $g(hkl)$ al sistema de ejes ortogonales.

	$g(h00)$	$g(0k0)$	$g(00l)$
Orientación I	$hg_1 \sin \beta$	$kg_2 \sin \alpha \cos \gamma'$	0
	0	$kg_2 \sin \alpha \sin \gamma'$	0
	$hg_1 \cos \beta$	$kg_2 \cos \alpha$	lg_3
Orientación II	$hg_1 \sin \gamma$	0	$lg_3 \sin \emptyset \sin \psi$
	$hg_1 \cos \gamma$	kg_2	$lg_3 \sin \emptyset \cos \psi$
	0	0	$lg_3 \cos \emptyset$
Orientación I	$-hg_1 \sin \beta$	$-kg_2 \sin \alpha \cos \gamma'$	0
Macla periclina	0	$kg_2 \sin \alpha \cos \gamma'$	0
	$-hg_1 \cos \beta$	$-kg_2 \cos \alpha$	$-lg_3$
Orientación II	$hg_1 \sin \gamma$	0	$lg_3 \sin \emptyset \sin \psi$
Macla albíta	$-hg_1 \cos \gamma$	$-kg_2$	$-lg_3 \sin \emptyset \cos \psi$
	0	0	$lg_3 \cos \emptyset$
Orientación II	$-hg_1 \sin \gamma$	$-kg_2 \sin \theta \sin \mu$	$-lg_3 \cos \xi \cos \chi$
Macla periclina	$-hg_1 \cos \gamma$	$kg_2 \sin \theta \cos \mu$	$-lg_3 \cos \xi \sin \chi$
	0	$-kg_2 \cos \theta$	$-lg_3 \sin \xi$

En esta tabla aparecen una serie de ángulos que en unos casos, α , β y γ , corresponden a los ángulos entre los vectores de la red recíproca $g\alpha$, $g\beta$ y $g\delta$; los restantes ángulos se calculan a partir de los anteriores. γ' es el suplementario del ángulo entre $a\alpha$ y $a\delta$, vectores fundamentales de la red cristalina. \emptyset y ψ se obtienen a partir de las relaciones

$$\begin{aligned} \lg \emptyset &= \cos \beta' \sin \alpha \\ \cos \psi &= \sin \beta' \sin \alpha \end{aligned}$$

siendo β' el suplementario del ángulo que forman $a\alpha$ y $a\delta$ de la red directa. Los ángulos θ , μ , ξ y χ se calculan a partir de α , β y γ pero las fórmulas correspondientes no se indican por su complejidad.

distancia entre las mismas, función del parámetro de periodicidad.

- Existencia de una segunda fase. En el caso de los feldespatos es frecuente la existencia de una segunda e incluso de una tercera fase, con relaciones de orientación con respecto a la primera, siendo las dimensiones de las celdas elementales distintas. En estas condiciones en el diagrama aparecen los nudos correspondientes a todas las redes recíprocas existentes.

c) Fenómenos de deformación mecánica, los cuales producirán la modificación de la forma de las manchas del diagrama de difracción, en función de la distorsión estructural producida.

d) Fenómenos de coherencia entre las fases existentes. Este hecho provoca la aparición de trazos que unen los nudos correspondientes a las fases entre las que se producen los fenómenos de coherencia.

Todos estos fenómenos han sido descritos por Smith y colaboradores, encontrándose ejemplos de ellos en los trabajos de dicha escuela. Mackenzie y Smith (1955), Smith (1955), Mackenzie y Smith (1956), Smith y Mackenzie (1958), Smith y Mackenzie (1959) y Emeleus y Smith (1959).

METODO EXPERIMENTAL

Los diagramas de difracción obtenidos corresponden a la

técnica del cristal oscilante, habiéndose efectuado oscilaciones que varían entre 30° y 190° para los mismos cristales. Una segunda variable considerada ha sido la orientación de los cristales con respecto al eje de oscilación. Se ha usado como eje de giro la dirección [010] y la normal al plano (001).

El material es triturado hasta conseguir fragmentos cuyo volumen esté comprendido entre 0,1 y 1 mm³, los cuales se orientan en las direcciones deseadas mediante un goniómetro óptico. La primera orientación puede efectuarse con cierta dificultad, pues los únicos reflejos utilizables son los dados por los planos de exfoliación (001), el cual es muy bueno, y (100), mucho peor. La segunda orientación es fácil de alcanzar usando precisamente el reflejo del plano de exfoliación (001). El primer método es el propuesto por Smith y Mackenzie en 1955.

El ajuste final de orientación mediante los rayos X es fácil de realizar en el primer caso, pues las manchas en la placa están casi alineadas perpendicularmente al eje de giro. En el segundo caso en cambio, es muy difícil mejorar la orientación obtenida por medios ópticos. La tabla 2 indica el origen de las muestras utilizadas.

La interpretación de los resultados se ha efectuado en dos fases. Se calcula el diagrama teórico para la orientación dada y con estos datos se dibuja una plantilla que permite dar los índices a las manchas observadas; a continuación se efectúa la inspección de ciertas manchas y de la disposición de las manchas acompañantes, midiéndose la proyección de los vectores τ , a partir de los cuales se puede deducir el estado textural de cada muestra. Son fundamentales los nudos correspondientes a (200), (002), (220), (240), (242) y (252). La tabla 2 resume los resultados obtenidos.

CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas se refieren por un lado a la técnica y por otro lado a los resultados concretos. De las dos orientaciones usadas la que corresponde a [010], propuesta por Smith y Mackenzie, presenta dificultades en la orientación previa por medios ópticos, pero salvadas éstas, el ajuste final por medio de los rayos X es posible. Su interpretación es fácil, ya que las líneas de valor k constante aparecen casi como rectas y aquella para la cual k vale cero suministra información sobre el número de fases presentes. La dificultad está en alcanzar por medios ópticos una orientación que tenga un error inferior a 5° de la deseada sin los cuales no puede efectuarse el ajuste mediante rayos X. La orientación según la normal a la cara (001) es generalmente fácil de alcanzar por medios ópticos pero no es mejorable por rayos X, y todo el trabajo con el goniómetro de reflexión depende de la calidad de los planos de exfoliación. La interpretación de la placa se simplifica por el método descrito anteriormente.

Con respecto a los ángulos de oscilación son preferibles los valores altos a los bajos, pues en éstos el número de nudos de la red recíproca barridos por la esfera de Ewald puede ser demasiado pequeño.

Aunque el número de muestras no es demasiado elevado y no se ha efectuado un estudio petrológico de las muestras, pueden realizarse algunas observaciones interesantes. La primera y más evidente es que entre las muestras procedentes de pegmatitas existe una gran variabilidad en cuanto a sus características. Por otro lado pueden distinguirse tres grupos, junto a otros de difícil definición por el escaso número de muestras que lo forman.

Tabla 2

N°	Localidad	Feldespatos K monoclinico	Feldespatos K triclinico	Feldespatos Na triclinico	
1	Drachenfels (Renania)	Traquita	Presente	Orientado	
2	Sao Miguel de Piracaciba (Minas Gerais)	Pegmatita		Asociación M	Asociación M
3	Boal (Asturias)	Pegmatita		Asociación D	Ley albita
4	Lovios (Orense)	Roca desconocida		Ley albita	Ley albita C
5	Caldas de Reyes (Pontevedra)	Roca desconocida	Presente	Asociación D	Ley albita C
6	Porto (Zamora)	Pegmatita		Asociación M	Ley albita C
7	Porto (Zamora)	Roca desconocida	Presente	Asociación D	Ley albita
8	Porto (Zamora)	Ollo de sapo	Presente	Asociación D	Ley albita P
9	Porto (Zamora)	Paragneis	Presente	Asociación D	Ley albita P
10	Villarino (Salamanca)	Pegmatita		Ley albita	Ley albita C
11	Fermoselle (Salamanca)	Pegmatita		Ley albita	Ley albita
12	Aldehuela de la Bóveda (Salamanca)	Roca desconocida	Presente	Asociación D	Ley albita
13	Algosino (Tras os Montes)	Pegmatita		Asociación D	Ley albita
14	Santiuste (Guadalajara)	Gneis glandular	Presente	Asociación D	Ley albita
15	Zarzalejo de la sierra (Madrid)	Roca desconocida		Ley periclina	Ley albita C
16	Montseny (Gerona)	Pegmatita		Ley albita	Ley albita C

C = Coherencia entre las fases presentes.

P = Periodicidad en las maclas.

El primero lo forma la muestra 2, amazonita brasileña, y la muestra 6, pegmatita de Porto (Zamora), caracterizadas por la presencia de la asociación M.

El segundo grupo corresponde a las muestras 4, 10, 11 y 16 procedentes de pegmatitas de diversas procedencias, que presentan la relación macla albíta más macla albíta en las dos fases presentes y que por algunos aspectos del diagrama de difracción se relacionan con la muestra 6 del grupo anterior.

El tercer grupo lo forman las muestras 5, 7, 8, 9, 12, 14 que comprenden muestras correspondientes a fenocristales de gneises y a otras cuya roca no es conocida con exactitud. Todas ellas se caracterizan por la existencia de tres fases, una de las cuales presenta simetría monoclinica.

La técnica apunta pues grandes posibilidades en cuanto a elucidar las relaciones texturales presentes en los cristales de feldespato.

BIBLIOGRAFÍA

BROWN, W. L.; WILLAIME, C.; GUILLEMIN, C. (1972): Exsolución selon l'association diagonale dans une cryptoperthite: étude par microscopie électronique et diffraction des rayons X. *Bull. Soc. fr. Minéral. Cristallogr.* 95, 429-436.

- BURRI, C. (1962): A survey of feldspar twinning. *Norsk. Geol. Tidsk.* 42, 2, 193-206.
- DUPARC, L.; REINHARD, M. (1923): Les méthodes de Fedorof et leur application a la détermination des plagioclases. *Schweiz. Min. Pet. Mitt.* 3, 1-74.
- EMELEUS, C. H.; SMITH, J. V. (1959): The alkali feldspars VI Sanidine and orthoclase perthites from the Slieve Gullion Area. *Am. Min.* 44, 1187-1209.
- GORAI, M. (1951): Petrological studies on plagioclase twins. *Am. Min.* 36, 884-901.
- LAVES, F. (1950): The lattice and twinning of microcline and other potash feldspars. *Jour. Geol.* 58, 548-571.
- MACKENZIE, W. S.; SMITH, J. V. (1955): The alkali feldspars. I Orthoclase microperthites. *Am. Min.* 40, 707-732.
- MACKENZIE, W. S.; SMITH, J. V. (1956): The alkali feldspars. III An optical and X ray study of high temperature feldspars. *Am. Min.* 41, 405-427.
- SMITH, J. V. (1955): The alkali feldspars. II A simple X ray technique for the study of alkali feldspars. *Am. Min.* 40, 733-747.
- SMITH, J. V. (1974): *Feldspar minerals*, Berlin, Springer Verlag. Volumen 1, p. 179-203; Volumen 2, p. 303-398.
- SMITH, J. V.; MACKENZIE, W. S. (1958): The alkali feldspars. IV The cooling history of high temperature sodium rich feldspars. *Am. Min.* 43, 872-889.
- SMITH, J. V.; MACKENZIE, W. S. (1959): The alkali feldspars. V The nature of orthoclase and microcline perthites and observations concerning the polymorphism of potassium feldspar. *Am. Min.* 44, 1169-1186.

Recibido, abril 1978.