

## PETROLOGIA Y PETROGENESIS DEL BATOLITO DE ACHALA, PROVINCIA DE CORDOBA, A LA LUZ DE LA EVIDENCIA DE CAMPO

Marta G. de Patiño y Alberto E. Patiño Douce

El batolito de Achala, uno de los cuerpos graníticos mayores de las Sierras Pampeanas, ha sido objeto en años recientes de estudios geoquímicos detallados (Rapela, 1982; Rapela *et al.*, 1982). Sin embargo, a excepción de las minuciosas investigaciones petrográficas de Lira (1981, 1982), no existen a la fecha trabajos petrológico-geoquímicos integrados que tomen en cuenta la abundante evidencia de campo disponible sobre la que necesariamente debe basarse toda interpretación petrogenética.

Hace ya varios años uno de nosotros (G. de Patiño, 1981, 1982, 1984) comenzó un estudio detallado de un sector del batolito de Achala, a la latitud aproximada del camino de Altas Cumbres, entre las localidades de estancia San Bernardo al este y Panaholma al oeste. Dicho trabajo fue patrocinado por la Comisión Nacional de Energía Atómica y la versión completa del mismo se encuentra en preparación.

### LOCALIZACION GEOLOGICA

El basamento metamórfico de las sierras de Córdoba está constituido por terrenos metasedimentarios y metavolcánicos que han alcanzado, en el sector intruido por el batolito de Achala, el grado medio del metamorfismo regional (Winkler, 1976). En partes, las rocas han superado la isograda que marca el límite superior del metamorfismo de grado medio dando lugar a la generación de migmatitas con un paleosoma kinzigfítico (restita compuesta por biotita, cordierita y granate) un neosoma granodiorítico a tonalítico.

El batolito de Achala se intruye en este complejo metamórfico-migmatítico en una relación aproximada concordante en escala regional, conformando un macizo alargado en sentido nort-sur que paraleliza la dirección de esquistosidad de las metamorfitas. En escala local, en cambio, la relación de las rocas magmáticas con la caja es discordante y en general muy neta, manifestándose el carácter claramente intrusivo (alóctono) del batolito.

Este último punto tiene además una expresión muy notable en la aureola de metamorfismo

térmico que se ha desarrollado en la roca de caja. La asociación paragenética granate-sillimanita-cuarzo, que se encuentra en el gneiss regional en sectores alejados de la intrusión batolítica, permite inferir una presión hidrostática durante el metamorfismo regional de por lo menos 3 kb (Turner, 1981). Además, Gordillo (1979) ha calculado que los procesos anatécnicos generadores de migmatitas en varios sectores de las sierras de Córdoba tuvieron lugar a unos 6 kb de presión. Estos datos nos permiten acotar la profundidad del evento metamórfico regional en el área que fuera luego invadida por el batolito de Achala: entre 10 y 20 km por debajo de la superficie. En contraste, en sectores inmediatamente adyacentes al contacto magmático se han desarrollado hornfels a expensas de las rocas de metamorfismo regional, cuyas paragénesis son indicadoras de condiciones distintas. La coexistencia de moscovita y cuarzo sin feldespato potásico en hornfels de esquistos biotíticos y la asociación paragenética tremolita-calcita-cuarzo-diópsido en hornfels de esquistos anfibólicos, adyacentes en el campo de los primeros, indican una presión del orden de 1,5 kb y una temperatura de aproximadamente 500°C (Winkler, *op. cit.*). La intrusión batolítica tuvo lugar, por lo tanto, a profundidades no mayores que 5 km, lo que requirió la erosión de unos 10 km de roca posteriormente al pico de metamorfismo regional y antes del emplazamiento granítico.

### RASGOS PETROLOGICOS Y GEOQUIMICOS

En el sector que estudiamos, el batolito de Achala está compuesto por al menos ocho cuerpos intrusivos mayores y un número muy grande de diques y pequeños cuerpos de rocas altamente diferenciadas. Sobre la base de evidencias de campo, petrográficas y geoquímicas hemos podido determinar que estos intrusivos se agrupan en dos secuencias magmáticas sucesivas en el tiempo\*. Si bien existen diferencias importantes entre ellas, ambas secuencias son

\* Las dataciones Rb-Sr están siendo preparadas por el IN-GEIS.

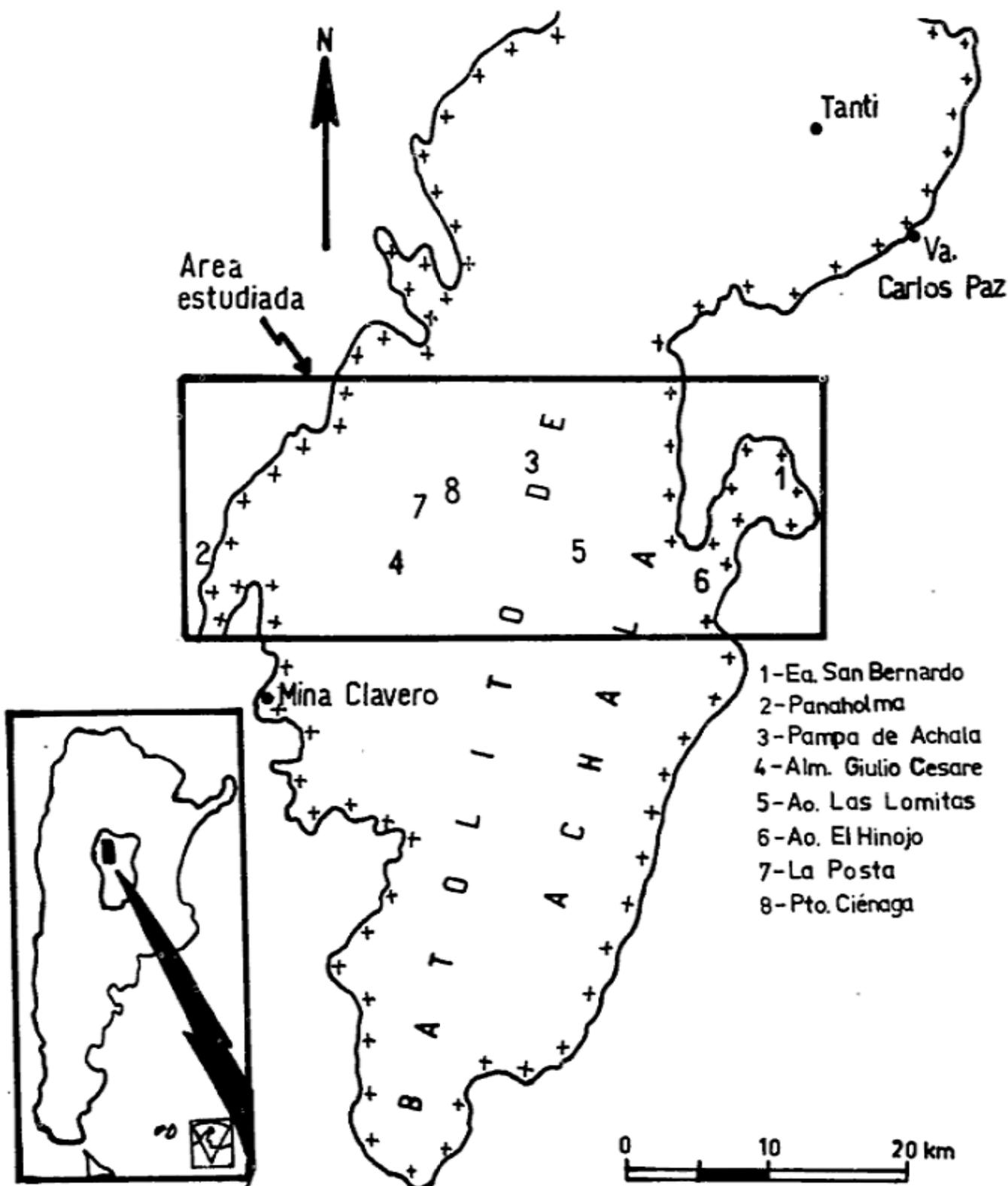


Figura 1: Mapa del Batolito de Achala, Córdoba.

peraluminosas, como ya lo indicara Rapela (*op. cit.*). En el esquema de Miller (1985) son granitoides fuertemente peraluminosos (tipo Ps) ya que contienen minerales más aluminosos que la biotita: moscovita y ocasionalmente sillimanita, cordierita y granate. El corindón normativo está casi siempre por encima del 5 % en peso, llegando en algunas rocas hasta el 9 %.

La secuencia magmática más antigua que hemos reconocido (a la que llamamos Secuencia

I) es la que constituye la mayor parte del batolito a la latitud de nuestro trabajo. Comienza con intrusiones pequeñas (hasta 2 km de diámetro) y aisladas de tonalitas, en general muy desmembradas por los intrusivos posteriores. Es también frecuente encontrar xenolitos de rocas tonalíticas, en general redondeados y parcialmente asimilados, incluidos en rocas graníticas posteriores. No hemos detectado, en cambio, rocas magmáticas de composición más básica, ni

siquiera como enclaves dentro de las tonalitas, lo que indicaría que la Secuencia I comienza con la intrusión de rocas de esta composición.

A este primer evento magmático sigue la intrusión de términos más ácidos, a los que llamamos sucesivamente, Granitos Panaholma, Achala y Giulio Césare. La composición mineralógica de estas tres unidades es similar: cuarzo, microclino, oligoclasa ácida (ocasionalmente albita), biotita, moscovita, ilmenita y magnetita. Los accesorios característicos son apatita y circón y es también frecuente la presencia de sillimanita y, muy raramente cordierita. Es característica, en todas las rocas correspondientes a la Secuencia I, la ausencia de titanita.

El Granito Panaholma está compuesto estrictamente por granitos  $\beta$  y granodioritas (Streckeisen, 1976) de grano mediano y color gris claro a rosado. Constituye una facies marginal del batolito. Está intruido por el Granito Achala, un granito  $\beta$  de grano grueso y color rosado, característicamente porfiroide debido al desarrollo de megacrystalos metasomáticos de microclino y plagioclasa. Es el miembro más difundido de la Secuencia I y el que siempre ha sido tomado como el granito característico del batolito de Achala. El Granito Giulio Césare, compuesto por granitos  $\beta$  isométricos de grano mediano a fino y color rosado, intruye a su vez al Granito Achala y tiene una distribución regional semejante a la de este último. La relación de campo entre ambas unidades es compleja, dado que el nivel erosivo actual, coincide aproximadamente con el techo de la intrusión del Granito Giulio Césare, dando como resultado una profusa interdigitación de apófisis y tabiques. Recalquemos que el Granito Giulio Césare nunca es porfiroide; en el Granito Panaholma, en cambio, se desarrollan megacrystalos de feldespato alcalino cerca de los contactos con Granito Achala.

Las proporciones de cuarzo, ortosa y albita normativos de muestras con una relación anortita normativa/albita normativa menor que 0,05 se agrupan en tres campos bien definidos, correspondientes a los Granitos Panaholma, Achala y Giulio Césare. De éstos, sólo el campo representativo del Granito Achala se ubica aproximadamente en una composición de mínima temperatura (Tuttle y Bowen, 1958; Luth *et al.*, 1964), correspondiente a una presión de agua de aproximadamente 2 kb. Nótese la buena correlación de este resultado con el obtenido a partir de la paragenesis mineral de los hornfels.

Tanto el Granito Panaholma como el Giulio Césare habrían cristalizado a partir de líquidos parcialmente fraccionados, mientras que Achala

sería el resultado de un magma fuertemente fraccionado. El enriquecimiento en agua que suele producirse en este tipo de magmas condujo, en las últimas etapas de cristalización del Granito Achala, a la separación de un fluido acuoso supercrítico que removilizó a los alcalis (y preferentemente al potasio, Marmo, 1971). Este dio lugar a la cristalización metasomática subsolidus de los megacrystalos de feldespato alcalino que caracterizan al Granito Achala y a sectores del Panaholma cercanos al contacto con aquél.

La actividad magmática tardía correspondiente a la Secuencia I ha sido muy intensa. Dio origen a pequeños plutones (de aproximadamente 1 km de diámetro) de alaskitas moscovíticas y a un séquito de diques de microgranitos, leucogranitos granatíferos, leucogranitos turmaliníferos, aplitas y pegmatitas.

La Secuencia II está compuesta por un conjunto de rocas intrusivas en la Secuencia I, que constituyen plutones de dimensiones del orden de 3 a 10 km, con una notable alineación noroeste-sureste. Esta dirección contrasta con la alineación norte-sur característica del batolito en conjunto y debida a las intrusiones correspondientes a la Secuencia I.

Hemos reconocido tres unidades distintas dentro de la Secuencia II, a las que hemos llamado, en orden de edad decreciente, Tonalita Las Lomitas, Granito El Hinojo y Granito La Posta. La primera es una tonalita biotítica de grano fino y color gris oscuro que intruye al Granito Achala en las inmediaciones del arroyo Las Lomitas. El Granito El Hinojo, que se caracteriza por el desarrollo de "nidos" biotíticos de hasta 3 cm de diámetro, es un granito  $\beta$  de grano mediano y color gris que incluye xenolitos fuertemente asimilados de Granito Achala y de rocas apliticas. El miembro más joven y de mayor distribución areal de la Secuencia II es el Granito La Posta, un granito  $\beta$  de grano fino y color gris oscuro. Intruye al Granito Achala y a pegmatitas correspondientes a la Secuencia I; la relación está muy bien expuesta entre La Posta y Puesto Ciénaga.

Cualitativamente, la composición mineralógica de las rocas de la Secuencia II es similar a la de la Secuencia I. Hay, sin embargo, algunas diferencias importantes: la titanita, característicamente ausente en esta última, es un accesorio frecuente en las rocas de la secuencia más joven, que además nunca contienen sillimanita. Estas diferencias indican un grado de sobresaturación en la mina ("peraluminosidad") menor para la Secuencia II que para la I (Miller, *op. cit.*; Chappell y White, 1974).

La variación de la peraluminosidad con la evolución magmática también es distinta en

ambas secuencias. En la más antigua, la sobresaturación en alúmina muestra una tendencia, pobremente definida, a disminuir hacia los términos más diferenciados. En la Secuencia II el grado de peraluminosidad no muestra ninguna correlación con la evolución magmática.

Hemos encontrado que la relación Th/U es característica para cada secuencia. En rocas granitoides de muchos lugares del mundo las relaciones Th/U "normales" o "medias" están en el intervalo 2,5 a 3,5 para tonalitas y 4 a 5 para granodioritas y granitos (Larsen y Gottfried, 1960; Rogers y Adams, 1969). En el batolito de Achala, las rocas correspondientes a la Secuencia I tienen relaciones Th/U entre 3 y 4,5, es decir, dentro del intervalo de valores normales. En la Secuencia II la relación Th/U varía entre 22 para la Tonalita Las Lomitas y 33 para el Granito La Posta. Estas relaciones, fuertemente anómalas, se deben exclusivamente a un enriquecimiento en torio de la secuencia más joven, con valores para el Granito La Posta de hasta 259 ppm (contra 20 ppm que es el contenido "normal" en granitos, Rogers y Adams, *op. cit.*). Los contenidos de uranio son similares en ambas secuencias, en el orden de 5 ppm.

Si bien no podemos por el momento dar una explicación satisfactoria para las relaciones Th/U anómalas, hemos podido comprobar que constituyen un criterio muy consistente en la distinción de ambas secuencias magmáticas.

## PETROGENESIS

La gran difusión de enclaves biotíticos (enclaves surmicáceos, Didier, 1973) en las rocas constituyentes del batolito de Achala tiene, a nuestro criterio, considerable importancia desde el punto de vista petrogenético. Estos enclaves, de tamaño variable entre pocos centímetros y decenas de metros, son restitas anatéticas desarrolladas a partir de metamorfitas de origen pelítico y psamo-pelítico. Su constituyente esencial es la biotita, que generalmente forma más de la mitad de la roca; contienen además cordierita (a veces en nódulos de varios centímetros de diámetro), moscovita, sillimanita, plagioclasa, apatita, ilmenita, magnetita, hematita, rutilo y, ocasionalmente, cuarzo. Se encuentran todos los términos intermedios, desde enclaves en los que la estructura esquistosa originales claramente discernible y en los que hay una importante proporción de componentes félsicos, hasta masas homogéneas de biotita casi pura, acompañada por cordierita, apatita y óxidos. En algunos casos es posible observar una transición gradual entre ambos extremos dentro de un mismo xenolito, en una distancia de pocos metros. También se encuentran enclaves de composición mixta, en los que sectores muy bio-

títicos están asociados con rocas de composición anfibólica.

Estos enclaves coexisten en las rocas de la Secuencia I con xenolitos y colgajos de esquistos biotíticos hornfelizados, en general angulosos y sin evidencias mineralógicas ni texturales de fusión. Es claro que ninguno de los magmas que dieron origen a las intrusiones de la Secuencia I tenía, en el momento de emplazarse, capacidad calorífica para fundir la roca de campo metamórfica. Concluimos por lo tanto que los enclaves biotíticos son restitas arrastradas por el magma desde sectores más profundos en los que tuvieron lugar procesos de anatexis cortical.

En nuestra opinión, la fusión de corteza continental metasedimentaria fue un proceso importante en la generación de los magmas de la Secuencia I. Sin embargo, hay argumentos geoquímicos que no concuerdan con un modelo enteramente palinogenético. Algunos de ellos, basados en la relación isotópica del estroncio y en la relación Rb/Sr, ya fueron presentados por Rapela (*op. cit.*), Rapela *et al.* (*op. cit.*) y Rapela y Gordillo (1981). Por otro lado, tampoco es posible aceptar la generación de secuencias magmáticas ácidas (y especialmente peraluminosas) de dimensiones batolíticas únicamente a partir de la fusión de rocas ultramáficas o máficas del manto o de la corteza inferior (cf. Miller, *op. cit.*; Wyllic, 1979; Carmichael *et al.*, 1974).

Hemos llegado a la conclusión preliminar que la composición química de elementos mayoritarios de los magmas de la Secuencia I puede explicarse como una mezcla de los siguientes componentes:

— El movilizado anatético de un gneiss tonalítico composicionalmente análogo a los gneisses regionales de las sierras de Córdoba y cuya restita complementaria tiene la composición de los enclaves biotíticos.

— Un magma básico (basáltico?).

En la Secuencia II se encuentran sectores con "estratificación fantasma" (cf. Pitcher, 1969) dentro del Granito La Posta, dada por folias biotíticas. Estas corresponden a enclaves biotíticos muy desmembrados y son, por lo tanto, relictos de roca metamórfica. Creemos que la Secuencia II también puede deberse a una mezcla de material anatético siálico con un magma básico.

En el momento de escribir estas líneas estamos abocados a fundamentar y cuantificar estas conclusiones preliminares.

## LISTA DE TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

CARMICHAEL, I. S. E., F. J. TURNER y J. VERHOOGEN, 1974. *Igneous Petrology*. Mc Graw-Hill, 739 pp, New York.

- CHAPPELL, B. W. y A. J. R. WHITE, 1974. Two contrasting granite types. Pacific Geol, 8: 173-174.
- DIDIER, J. 1973. Granites and their enclaves. Elsevier Sci. Pub., 393 pp., Amsterdam.
- GIMENEZ de PATIÑO, M., 1981. Informe preliminar sobre el estudio geológico-petroológico del Sector III del proyecto Sierra Grande, provincia de Córdoba, de la CNEA. Contr. 46, INGEIS, Buenos Aires.
- , 1982. Informe de avance sobre el estudio geológico-petroológico del Sector III, proyecto Sierra Grande CNEA, provincia de Córdoba. Contr. 60, INGEIS, Buenos Aires.
- , 1984. Informe de avance sobre el estudio geológico-petroológico del Sector III, proyecto Sierra Grande (CNEA), provincia de Córdoba. Inf. inéd. 1994, CNEA.
- GORDILLO, C. E., 1979. Observaciones sobre la petrología de las rocas cordieríticas de la Sierra de Córdoba. Acad. Nac. Cienc., Bol. LIII, (1-2), Córdoba.
- LARSEN, E. S. y D. GOTTFRIED, 1960. Uranium and thorium in selected suites of igneous rocks. Am. J. Sci., 258-A: 151-169.
- LIRA, R., 1981. Estudio geológico-petrográfico-mineralógico de las rocas graníticas de la Sierra de Córdoba en su relación con el contenido uranífero. CNEA, (in d.), Buenos Aires.
- , 1982. Interpretación de los resultados químicos, geoquímicos y petrográficos-petroológicos del muestreo realizado en la faja de relevamiento geológico I. CNEA, (inéd.), Buenos Aires.
- LUTH, W. C., R. H. JAHNS y O. F. TUTTLE, 1964. The granite system at pressures of 4 to 10 kilobars. J. Geophys. Res., 69: 759-773.
- MARMO, V., 1971. Granite petrology and the granite problem. Elsevier Sci. Pub., 244 pp., Amsterdam.
- MILLER, C. F., 1985. Are strongly peraluminous magmas derived from pelitic sedimentary sources? J. Geol. 93: 673-689.
- PITCHER, W. S., 1969. Ghost stratigraphy in intrusive granites: a review. En: G. Newall y N. Rast (eds.) Mechanism of Igneous Intrusion. Gallery Press: 123-140, Liverpool.
- RAPELA, C. W., 1982. Aspectos geoquímicos y petroológicos del batolito de Achala, provincia de Córdoba. Asoc. Geol. Arg., Rev., XXXVII: 313-330, Buenos Aires.
- , C. W. y C. E. GORDILLO, 1981. Coefficientes de partición de Litio, Rubidio y Estroncio entre la cordierita y el granate paragenético. Asoc. Geol. Arg., Rev., XXXVI: 180-186, Buenos Aires.
- , L. M. HEAMAN y R. J. MC NUTT, 1982. Rb-Sr geochronology of Granitoid Rocks from the Pampean Ranges, Argentina. J. Geol., 90: 574-582.
- ROGERS, J. W. y J. A. S. ADAMS., 1969. Thorium. En: K. H. Wedephol (ed.) Handbook of Geochemistry. Chap. 90, Springer-Verlag, Berlin.
- STRECKEISEN, A., 1976. To each plutonic rock its proper name. Earth Sci. Rev., 12:1-33.
- TURNER, F. J., 1981. Metamorphic petrology. Mc Graw-Hill, 524 pp., New York
- TUTTLE, O. F. y N. L. BOWEN, 1958. Origin of granites in the light of experimental studies in the system NaAl-Si<sub>3</sub>O<sub>8</sub>-KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O. Geol. Soc. Am. Mem. 74: 1-153.
- WINKLER, H. F., 1976. Petrogenesis of the metamorphic rocks. (4th. Ed.). Springer-Verlag, 334 pp, Berlin.
- WYLLIE, P. J., 1979. Petrogenesis and the physics of the Earth. En: H. S. Yoder Jr. (ed.) The evolution of the igneous rocks. Fiftieth anniversary perspectives. Princeton University Press, 483-520, New Jersey.

Recibido: 25 de junio, 1986

Acceptado: 5 de julio, 1986

MARTA G. DE PATIÑO  
ALBERTO E. PATIÑO DOUCE

Department of Geology  
University of Oregon  
Eugene, O.R. 97403  
U.S.A.