

Geotermobarometría de la paragénesis cuarzo-plagioclasa-biotita-granate-sillimanita en gneises del sector centro-oriental de la sierra de Comechingones, Córdoba

Alina B. GUERESCHI y Roberto D. MARTINO

CONICET y Departamento de Geología Básica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Av. Vélez Sársfield 299. 5000-Córdoba.
E-mails: aguersch@com.uncor.edu, rdmartino@com.uncor.edu.

RESUMEN. El basamento metamórfico del sector centro oriental de la Sierra de Comechingones (Córdoba) está compuesto principalmente por gneises biotíticos granatíferos, migmatitas estromatíticas y diatexitas. Durante el pico metamórfico regional M2-D2 se habrían alcanzado condiciones de alto grado, que produjeron fusión parcial en metapelitas y desarrollaron la foliación metamórfica S_2 . Para determinar las condiciones de presión y temperatura imperantes en la región durante el pico metamórfico M2, se seleccionaron muestras de gneises biotíticos granatíferos, en las que se analizaron por microsonda las fases minerales principales. El geotermómetro granate-biotita y el geobarómetro granate-plagioclasa-silicato de aluminio-cuarzo (GASP), complementado con el barómetro granate-rutilo-silicato de aluminio-ilmenita-cuarzo (GRAIL), fueron aplicados a la paragénesis Qtz + Pl + Bt + Grt + Sil. Los granates exhiben grados variables de resorción, con bordes engolfados y contornos cristalinos irregulares. La resorción retrógrada parcial es corroborada por los perfiles de granate, los que muestran fuerte enriquecimiento en Fe y menor en Mn hacia los bordes. Para termobarometría fueron elegidos puntos de granate hacia adentro del borde modificado para evitar los efectos retrógrados, ya que se considera que esa es la mejor aproximación posible a las condiciones durante el pico metamórfico. Esas composiciones fueron complementadas con biotita y/o plagioclasa de la matriz para los cálculos de P-T. Los resultados termobarométricos obtenidos, 776°C de temperatura y 7,9 kb de presión, son compatibles con los equilibrios de fases minerales observados y la naturaleza migmatizada de gran parte del área. Estos resultados para el evento M2-D2 indican condiciones metamórficas típicamente barrovianas durante el climax de la colisión del terrane Pampia con el margen occidental de Gondwana.

Palabras clave: Petrología metamórfica, Geotermobarometría, Gneises, Sierras de Córdoba

ABSTRACT. *Geothermobarometry of Qtz + Pl + Bt + Grt + Sil paragenesis in high-grade gneisses from central-eastern portion of Sierra de Comechingones.* The metamorphic basement on the central portion of Sierra de Comechingones (Córdoba), consist mainly of Bt-Grt Bt-Grt («ø Sil) gneisses, stromatic migmatites and diatexitas. During metamorphic regional peak M2-D2, high-grade conditions have been reached, producing partial melting of metapelitic rocks and developing a pervasive metamorphic foliation S_2 . To determine pressure and temperature conditions during M2, Bt-Grt-Sil gneisses samples were selected and main mineral phases were analyzed by microprobe. Grt-Bt thermometry and GASP barometry (Grt-Sil-Qtz-Pl), supplemented by GRAIL barometry (Grt-Rt-Sil-Il-Qtz) were applied to the Qtz + Pl + Bt + Grt + Sil paragenesis. The garnets exhibit varying degrees of resorption with embayed edges and irregular crystal outlines. Partial retrograde resorption is corroborated by garnet profiles, which show strong Fe and minor Mn enrichment at the rims. Grt points inside the modified rim were chosen for thermobarometry to avoid the retrograde effects and are believed to be the closest possible approximation to metamorphic peak conditions. These compositions were paired with matrix biotite and/or plagioclase for the P-T calculations. The thermobarometric results of 776°C and 7,9 kb are consistent with the observed phase equilibria and the migmatized nature of the area. These results for M2-D2 event indicate typically barrovian metamorphic conditions during the climax of collision of Pampia terrane with the western Gondwana margin.

Key words: Metamorphic petrology, Geothermobarometry, Gneisses, Sierras de Córdoba.

Introducción

El sector centro oriental de la sierra de Comechingones (provincia de Córdoba) está conformado por un basamento metamórfico-migmatizado de alto grado, compuesto predominantemente por gneises biotíticos granatíferos, ortogneises, migmatitas heterogéneas (metatexitas estromatíticas) y homogéneas (diatexitas). En menor proporción se encuentran

mármoles, anfíbolitas, milonitas, cuerpos granitoides, rocas básicas y ultrabásicas. El área ha sido cartografiada y estudiada en forma detallada en sus aspectos petrológicos y estructurales por Guerreschi (2000). Otros estudios que abarcan parte del área son los de Guerreschi (1992), Guerreschi y Baldo (1993), Martino *et al.* (1997), Chincarini *et al.* (1998) y Guerreschi y Martino (1998).

El presente trabajo tiene por objetivo la determina-

ción de las condiciones de presión y temperatura que experimentaron las rocas metamórficas del área estudiada durante el pico metamórfico M2, utilizando para ello los gneises de alto grado con la paragénesis $Qtz + Pl + Bt + Grt + Sil$.

El área estudiada se ubica en el departamento Calamuchita, pedanías Cañada de Álvarez y Río de Los Sauces, de la provincia de Córdoba. Se accede a la misma a través de la ruta nacional 36 o por la ruta provincial 5 (Fig. 1a), que unen la ciudad de Córdoba con la localidad de Berrotarán. Desde allí hacia el oeste, las rutas provinciales E-63 y 23, junto con otros caminos secundarios, permiten llegar al resto del área.

Metodología

La composición química de las fases minerales de interés metamórfico fue determinada mediante la técnica de microanálisis por sonda de electrones. Las rocas para análisis fueron seleccionadas de acuerdo con el tipo de roca predominante en el área (gneises biotíticos granatíferos), la paragénesis mineral desarrollada (granate-biotita-sillimanita-plagioclasa-cuarzo), el grado de alteración (se evitaron alteraciones secundarias), la intensidad de la deformación (preferentemente baja), la relación granate/biotita (preferentemente rocas ricas en biotita, con $Bt \gg Grt$) y el

tamaño de grano de los granates (preferentemente grandes).

Por la limitada disponibilidad para realizar análisis, luego del estudio petrográfico detallado de 30 secciones delgadas de gneises biotíticos granatíferos de toda el área, se seleccionaron dos muestras representativas del conjunto: CA-40 y SL-29. Con las muestras elegidas se prepararon secciones delgadas estándar, sin cubrir, pulidas con alúmina alfa y cubiertas con carbón. Los análisis minerales fueron efectuados con una microsonda CAMECA SX-50 en el Virginia Polytechnic Institute sito en Blacksburg (Virginia, Estados Unidos), con un voltaje de aceleración de 15 kV, una corriente de espécimen de 15 nA y un diámetro de rayo de 1 mm, excepto para biotita y feldespatos, en los que se usó un diámetro de rayo mayor (10 mm). Se utilizaron minerales naturales y óxidos sintéticos como estándares. Los datos fueron calculados empleando el método de Bence y Albee (1968).

Para el cálculo de las condiciones de presión y temperatura se usó el programa *Thermobarometry* (versión 2.1) para computadoras Macintosh de Spear y Kohn (1999). Una vez introducidos los datos en cationes de los distintos minerales, el programa realiza los cálculos de acuerdo con los termómetros y/o barómetros seleccionados y los proyecta en un diagrama P-T. El conjunto de datos resultante fue tratado estadísticamente a fin de obtener los valores medios de las curvas correspondientes a cada geotermómetro y

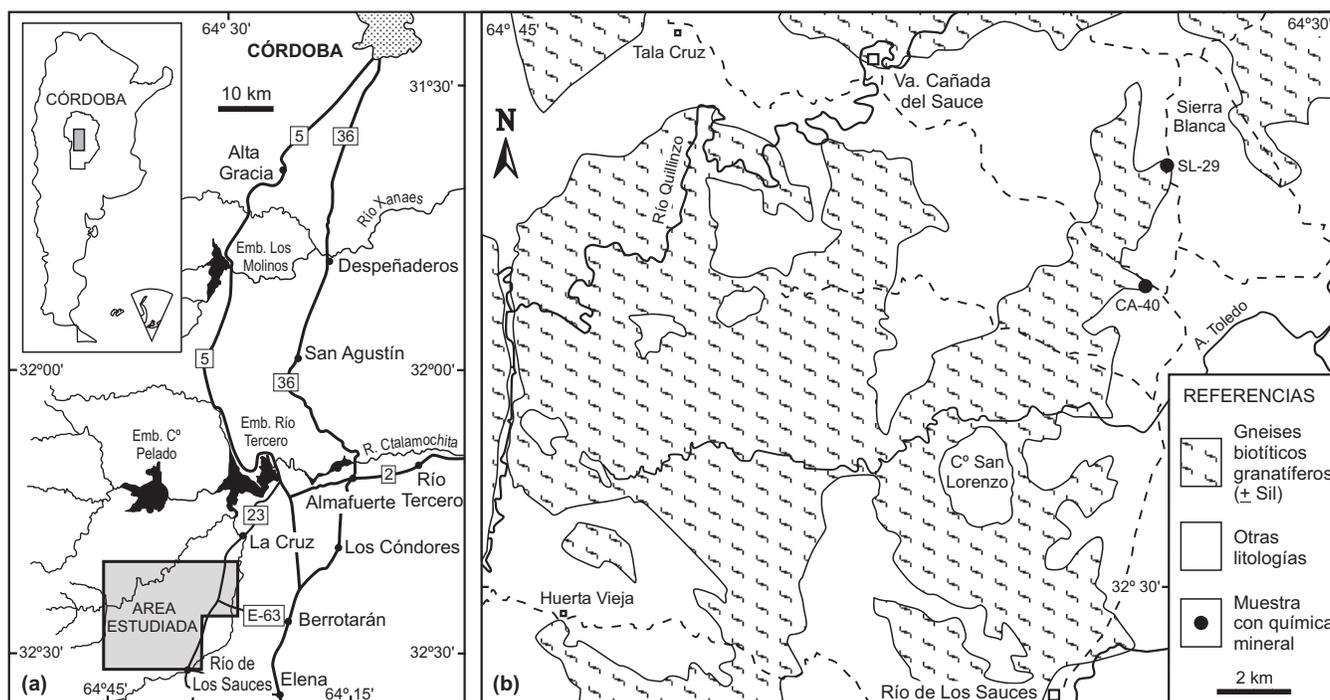


Figura 1: a, Ubicación geográfica y accesos del área estudiada. b, Esquema litológico del sector centro-oriental de la sierra de Comechingones donde se muestran los afloramientos de los gneises biotíticos granatíferos estudiados. La orientación de la traza de los gneises coincide con la tendencia general de la foliación; el buzamiento es hacia el noreste con ángulos moderados. Para una cartografía detallada en la que se incluye el resto de las litologías ver Guerreschi (2000).

geobarómetro para las distintas muestras. Dichos valores medios fueron proyectados en un diagrama P-T, junto con las curvas de estabilidad de los trimorfos del silicato de aluminio. Los valores P-T correspondientes a cada muestra fueron determinados gráficamente en el punto de intersección de las curvas de los geotermómetros y geobarómetros respectivos.

Geología de los gneises biotíticos granatíferos

Son las rocas de mayor distribución areal en este sector de la sierra de Comechingones (Martino *et al.* 1997) y encajonantes de las restantes unidades (Fig. 1b). En fotografía aérea presentan tonos grises, textura rugosa anisótropa y forman lomas ligeramente alargadas y levemente asimétricas según la dirección de la foliación metamórfica dominante S_2 . Esta última tiene rumbos noroeste-sudeste a norte-sur y buzamientos con ángulos variables hacia el este o nordeste. En el afloramiento forman lajas gruesas, aunque en ciertos sectores poseen una foliación más grosera y adquieren un aspecto algo abochado.

Son rocas grises en las que se destaca un bandeo composicional dado por capas alternantes de biotita y de cuarzo + plagioclasa. La textura es granolepidoblástica de grano medio a fino, más raramente porfiroblástica. Se han reconocido dos variedades de gneises biotíticos granatíferos: una predominante compuesta por cuarzo, plagioclasa, biotita y granate; y otra menor que contiene sillimanita ± feldespatos potásicos, además de los minerales mencionados. Esta última variedad, sin expresión cartográfica a la escala de la figura 1b, aparece intercalada a modo de septos o bancos en la variedad predominante.

No se ha detectado la presencia de muscovita primaria en ninguna de las dos variedades de gneises. El granate suele tener núcleos poiquilíticos con inclusiones frecuentemente orientadas de plagioclasa, cuarzo, biotita, minerales opacos y menos frecuentemente rutilo, y un borde libre de inclusiones. Se encuentra asociado a biotita y plagioclasa; en este último caso, se forman coronas de plagioclasa alrededor de granate, con distinto grado de desarrollo. Como accesorios se observan apatita, circón y minerales opacos, en tanto que rutilo, espinelo y estauroлита aparecen ocasionalmente como relictos. A escala microscópica, la foliación S_2 está dada por la orientación preferente de biotita ± sillimanita y de agregados de cuarzo elongado en forma de cinta.

La variedad de gneises con sillimanita ha sido seleccionada para análisis mineral y utilizada en los cálculos termobarométricos. En estas rocas, la sillimanita puede ser prismática o fibrosa y generalmente se asocia a las capas biotíticas. Cuando la roca está intensamente deformada, en cercanías de zonas de cizalla, la sillimanita tiende a ser predominantemente fibrolita y los gneises adquieren texturas miloníticas.

La cartografía, descripción petrográfica detallada e interpretación petrológica de los otros tipos de rocas del área de la figura 1b se encuentran en Guerreschi (2000) y en Guerreschi y Martino (en prensa). Los símbolos utilizados para los minerales corresponden a Kretz (1983).

Características de las muestras analizadas

Muestra CA-40: Se ubica en el sector este del área estudiada (Fig. 1b). La textura es granoblástica elongada de grano medio a fino, con foliación S_2 bien desarrollada y cintas de cuarzo. Su asociación mineral es: cuarzo, plagioclasa, biotita, granate, sillimanita, espinelo, apatita, circón y minerales opacos. La biotita es de color pardo rojizo y relativamente abundante. La sillimanita es prismática y se halla únicamente en ciertos sectores de la roca. El granate forma generalmente porfiroblastos alargados, de gran tamaño (< 7 mm), a veces poiquilíticos, con numerosas inclusiones de cuarzo y biotita. Tiene contornos irregulares y engolfados, con bordes parcialmente resorbidos. Los minerales opacos fueron identificados ópticamente como ilmenita. El escaso espinelo verde es relicto y se encuentra en ciertos sectores como inclusión en pequeños granates, sillimanita y plagioclasa.

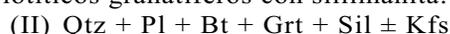
Muestra SL-29: Se ubica en el sector nordeste del área (Fig. 1b). La textura es granolepidoblástica elongada de grano medio a fino, con buena foliación S_2 y leve bandeo. Su asociación mineral es: cuarzo, plagioclasa, feldespatos potásicos, biotita, granate, sillimanita, apatita, circón y minerales opacos. La biotita es de color pardo rojizo y relativamente abundante. La sillimanita generalmente es fibrosa y forma fajas. Los granates son redondeados, de grano fino (< 2 mm), con bordes resorbidos e inclusiones de cuarzo y biotita. Los minerales opacos se encuentran en la matriz y fueron identificados ópticamente como grafito y, en menor proporción, ilmenita.

Consideraciones petrogenéticas

El evento metamórfico más importante registrado por las rocas del área es el M2, durante el cual se habría producido el pico térmico y la blástesis orientada de biotita ± sillimanita que dio origen a la foliación metamórfica S_2 . En la variedad de gneises biotíticos granatíferos sin sillimanita, la paragénesis más común y extendida en toda el área es:

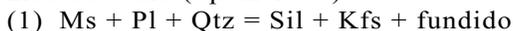


Pero la paragénesis más significativa de este evento es la desarrollada en la variedad de gneises biotíticos granatíferos con sillimanita:



la que también es característica de las migmatitas estromatíticas que afloran en Huerta Vieja y Tala Cruz

(Fig. 1b). Esta paragénesis es típica de gneises pelíticos en 'alto grado con [almandino]' y es la paragénesis de mayor presión en la secuencia de zonas de Winkler (1979). Dicha paragénesis indica que se habrían superado las condiciones de estabilidad de la muscovita en metapelitas aluminosas con bajo contenido de sodio (Spear 1993):



quedando las rocas dentro de la Zona de Sillimanita + Feldespato Potásico (segunda isograda de sillimanita), circunstancias en las que las rocas de composición pelítica se funden en condiciones de $P_{\text{H}_2\text{O}} < P_t$ y donde la muscovita faltante habría provisto la fase fluida necesaria para que ocurra fusión parcial. Esto se ve reflejado en la ausencia total de muscovita primaria, en la generación de sillimanita \pm feldespato potásico y en el desarrollo de estructuras migmatíticas de tipo estromatítico en gran parte del área (Guerreschi y Martino 1998).

A partir de la paragénesis (II) podría deducirse que se habrían alcanzado las condiciones de estabilidad de la reacción (Le Breton y Thompson 1988):



Como no se han encontrado evidencias texturales de la desestabilización de $\text{Bt} + \text{Sil} + \text{Qtz}$, se presume que las condiciones de esta reacción no habrían sido superadas.

De acuerdo con las composiciones minerales y paragénesis señaladas, puede afirmarse que los protolitos originales de los gneises biotíticos granatíferos con sillimanita y de las migmatitas del área serían derivados de rocas de composición pelítica, los que conformarían, como se dijo anteriormente, intercalaciones menores dentro de una secuencia mayoritaria derivada de grauvacas (variedad de gneises biotíticos granatíferos sin sillimanita). Lo expresado contrasta con la propuesta de Otamendi *et al.* (1999) de que los gneises y migmatitas de la sierra de Comechingones derivan fundamentalmente de protolitos grauváquicos, afirmando que sillimanita + muscovita se encuentran asociadas únicamente a zonas de cizalla (ver también Otamendi *et al.* 2000).

Las paragénesis y texturas de reacción reconocidas para los distintos eventos metamórficos prógrados y retrógrados, así como la trayectoria textural deducida para las rocas metamórficas del área (Guerreschi 2000), son motivo de un trabajo complementario a éste (Guerreschi y Martino, en prensa).

Química mineral

A continuación se describirán las principales características químicas de los minerales analizados: granate, biotita y plagioclasa. Las composiciones medias de los minerales utilizados en los cálculos termobarométricos se muestran en el Cuadro 1. Los análisis completos se encuentran en Guerreschi (2000).

Granate

Muestra CA-40: El granate es rico en almandino (65-70%) y piropo (25-30%), con contenidos muy bajos de grosularia (3-7%) y espesartina (2-3%), típicos de granates de alto grado (Fig. 2a). La relación $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ es bastante uniforme dentro del núcleo (alrededor de 0,68-0,72), con un suave incremento desde el centro hacia la zona de borde y luego un brusco aumento al aproximarse al borde propiamente dicho, alcanzando valores de 0,80. El almandino exhibe un perfil similar al de la relación $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$, mostrando un núcleo relativamente uniforme con valores que van entre 0,63 y 0,68 desde el núcleo hacia la zona de borde y un marcado incremento en el borde propiamente dicho, con valores cercanos a 0,75. El perfil del piropo posee la relación inversa, con un núcleo uniforme relativamente rico en Mg (entre 0,25-0,30 de piropo) y un borde empobrecido (0,18 de piropo). Presenta una zonación composicional en el contenido de grosularia, con un núcleo rico en Ca (hasta 0,07 de grosularia) y un descenso marcado al pasar a la zona externa del granate (0,02-0,03). El granate manifiesta muy poca zonación con respecto al contenido de

Cuadro 1: Composiciones medias de los minerales utilizados en los cálculos termobarométricos (biotita y plagioclasa de la matriz, puntos de granate hacia el interior del borde externo modificado).

	BDTTA		GRANATE		PLAGIOLASA			
	CA-40	SL-29	CA-40	SL-29	CA-40	SL-29		
SiO_2	35,581	35,826	37,815	38,493	60,385	61,884		
TiO_2	4,761	4,543	0,017	0,002	—	—		
Al_2O_3	18,838	18,754	22,785	22,489	25,575	25,344		
Cr_2O_3	0,063	0,046	—	—	—	—		
FeO	15,979	16,262	31,095	32,243	0,012	0,076		
MnO	0,060	0,004	1,379	1,192	—	—		
MgO	11,076	10,901	6,848	6,604	—	—		
CaO	0,017	0,013	1,136	1,032	6,321	5,858		
BaO	0,084	0,124	—	—	0,047	0,011		
Na_2O	0,072	0,079	—	—	8,384	8,551		
K_2O	9,420	9,395	—	—	0,313	0,194		
P_2O_5	0,018	0,030	—	—	0,089	0,180		
Cl	0,015	0,010	—	—	—	—		
F	0,343	0,339	—	—	—	—		
Total	96,327	96,324	101,074	102,055	100,925	101,398		
Cationes	22 oxígenos		12 oxígenos		8 oxígenos			
Si	5,295	5,334	Si	2,936	2,967	Si	2,667	2,684
Ti	0,533	0,509	Ti	0,001	0,000	Al	1,331	1,310
Al ^{IV}	2,705	2,666	Al	2,083	2,041	Fe	0,001	0,003
Al ^{VI}	0,598	0,623	Fe	2,019	2,079	Ca	0,300	0,275
Cr	0,007	0,005	Mn	0,091	0,078	Ba	0,001	0,000
Fe	1,989	2,025	Mg	0,793	0,759	Na	0,701	0,728
Mn	0,007	0,001	Ca	0,095	0,086	K	0,018	0,011
Mg	2,458	2,420	Total	8,018	8,009	P	0,004	0,007
Ca	0,003	0,002				Total	5,021	5,018
Ba	0,005	0,007						
Na	0,021	0,023	Al ^{III}	0,674	0,693			
K	1,789	1,785	P ^{IV}	0,264	0,253	An	0,294	0,272
P	0,002	0,004	Sps	0,030	0,026	Ab	0,688	0,718
Total	15,413	15,403	Grs	0,032	0,028	Or	0,018	0,011
$\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$	0,447	0,456	$\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$	0,718	0,733			

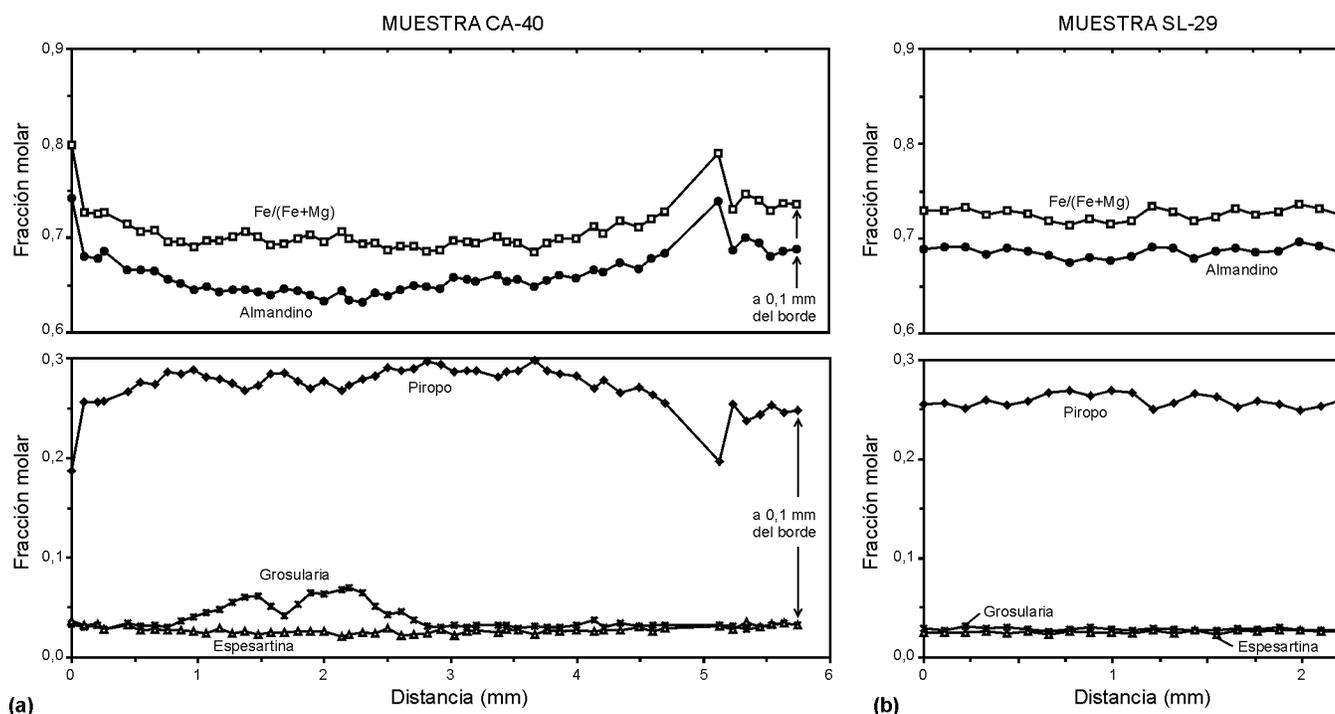


Figura 2: Perfiles composicionales de granate donde se indican las fracciones molares de Fe/(Fe+Mg), almandino, piropo, grosularia y espesartina en las muestras analizadas. **a.** muestra CA-40. **b.** muestra SL-29.

espesartina, con un perfil muy suave, con un leve incremento hacia los bordes, que pasa de 0,02 en el núcleo a 0,035 en los bordes. La relación $(Ca+Mn)/(Ca+Mn+Fe+Mg)$ varía entre 0,054-0,090 y se ubica ampliamente por debajo del valor mínimo sugerido por Ferry y Spear (1978) para usar su calibración del termómetro granate-biotita ($\leq 0,20$), por lo que no serían significativas las correcciones por Ca y Mn en granate.

El núcleo rico en Ca (Fig. 2a) se puede interpretar como la preservación de una zonación de crecimiento del granate (durante un evento prógrado M1), favorecida probablemente por el tamaño de grano del granate (casi 6 mm) y la baja difusividad intracristalina del Ca. Los perfiles relativamente suaves de los otros componentes (Alm, Prp y Sps) y de la relación Fe/(Fe+Mg) en la zona interna del granate indican que se habría producido una homogeneización por difusión en condiciones de alto grado. En cambio, el empobrecimiento en Mg hacia el borde, junto con el aumento en Fe y el leve incremento en Mn, pueden considerarse como producto de una zonación por difusión retrógrada en el borde durante el enfriamiento, como se deduce también por los bordes resorbidos que muestra el granate.

Muestra SL-29: Este granate se caracteriza por presentar un perfil composicional muy uniforme (Fig. 2b), sin variaciones de núcleo a borde. Está compuesto por 67-70% de almandino y 25-27% de piropo. Los contenidos de grosularia y espesartina son muy bajos, manteniéndose cada uno entre 2,5 y 3%. La relación

Fe/(Fe+Mg) también es muy uniforme, oscilando entre 0,71 y 0,73. La relación $(Ca+Mn)/(Ca+Mn+Fe+Mg)$ es muy constante, varía entre 0,050-0,058 y aún se pueden aplicar las consideraciones mencionadas para la muestra CA-40 sobre la utilización de la calibración de Ferry y Spear (1978) del termómetro granate-biotita ($\leq 0,20$). El perfil composicional casi plano de este granate se interpreta como producto de una alta homogeneización por difusión en condiciones de alto grado, sin que se registren evidencias de modificaciones posteriores durante el enfriamiento.

Biotita

La relación Fe/(Fe+Mg) en biotita varía entre 0,40 y 0,45 (Fig. 3). En general, en cada muestra la relación Fe/(Fe+Mg) es mayor en las biotitas de la matriz que en las biotitas adyacentes a granate. Los valores se ubican dentro del rango típico para biotitas de metapelitas de alto grado (Guidotti 1984).

Los contenidos de Al^{VI} varían entre 0,57-0,72 en la muestra CA-40 (Fig. 3a), siendo apenas de 0,51 en una biotita incluida en plagioclasa; en la muestra SL-29 se encuentran entre 0,55-0,80 (Fig. 3b). En general, los contenidos de Al^{VI} oscilan más altos en las biotitas adyacentes a granate y se sitúan dentro de los rangos típicos para biotitas de metapelitas de la zona de Sil + Kfs, sin muscovita ($< 0,7$ según Guidotti 1984). Los contenidos de Al^{IV} varían entre 2,58-2,79 en la muestra CA-40 y entre 2,57-2,70 en la muestra SL-29.

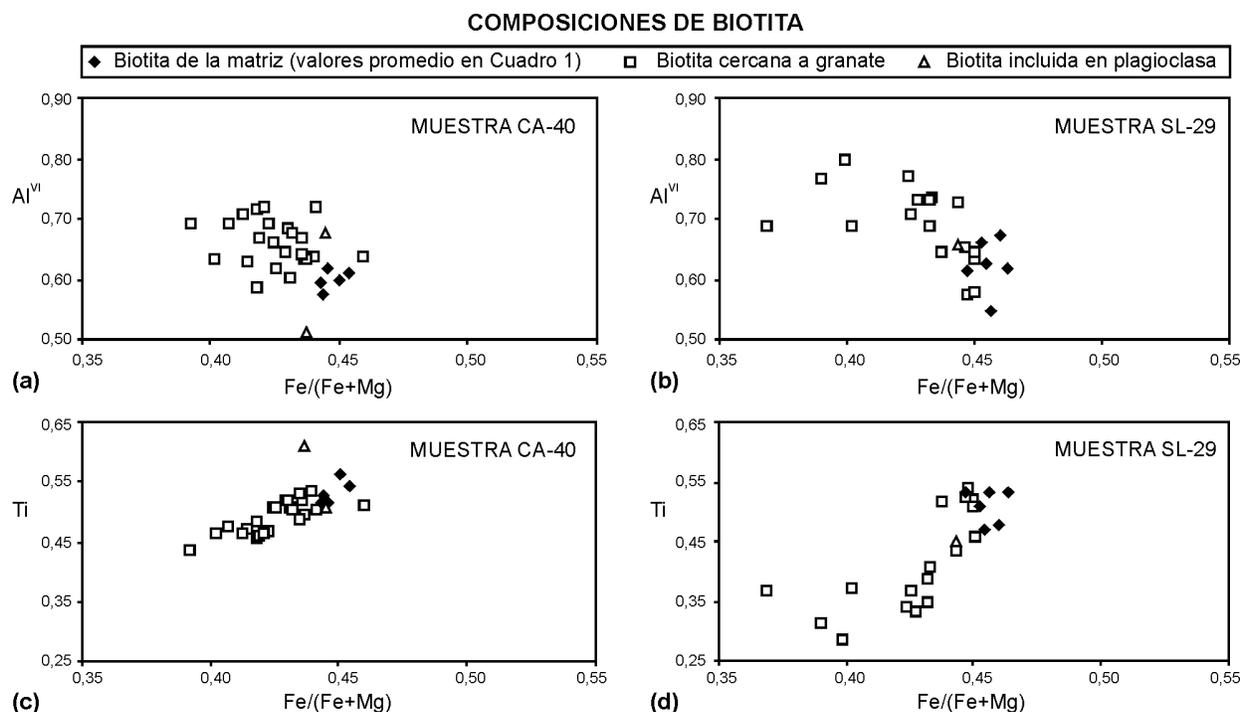


Figura 3: Composiciones de biotita en las muestras analizadas. **a-b,** Diagramas Al^{VI} versus $Fe/(Fe+Mg)$. **c-d,** Diagramas Ti versus $Fe/(Fe+Mg)$.

Los contenidos de TiO_2 son relativamente altos (3-5%), típicos de biotitas de alto grado, y se reflejan en el fuerte pleocroísmo y los colores rojizos de las láminas de biotita en sección delgada. Los contenidos de Ti (Fig. 3c,d) varían entre 0,43-0,56 en la muestra CA-40 (alcanzan 0,61 en una biotita incluida en plagioclasa) y entre 0,28-0,54 en la muestra SL-29. En general, los valores más altos de Ti corresponden a las biotitas de la matriz.

Los contenidos de F son relativamente altos (entre 0,2-0,4%) y se encuentran dentro de los rangos típicos de biotitas de metapelitas de la zona de la sillimanita (Guidotti 1984). Los cationes de F oscilan entre 0,18-0,38 en la muestra CA-40 y son algo más altos en la muestra SL-29 (0,25-0,50). Los contenidos de Cl son muy bajos en ambas muestras ($< 0,02$). Los contenidos de Na también son muy bajos (0,001-0,045), lo que es común en biotitas de paragénesis de metapelitas de alto grado. Las biotitas de rocas de alto grado también suelen contener una mínima cantidad de Cr ($< 0,012$ en este caso) y de Ba (cuando coexisten con feldespato potásico).

Se observa una relación directa entre la relación $Fe/(Fe+Mg)$ y el contenido de Ti (Fig. 3c,d), con los valores más altos de ambas variables en las biotitas de la matriz o en las biotitas incluidas en plagioclasa, y los valores más bajos en las biotitas asociadas a granate.

En general, se puede reconocer una proporción inversa entre la relación $Fe/(Fe+Mg)$ y el contenido de Al^{VI} , con los valores más altos de la relación $Fe/(Fe+Mg)$ y el contenido de Al^{VI} más bajo en las biotitas de la matriz (Fig. 3a,b).

La relación $(Al^{VI}+Ti)/(Al^{VI}+Ti+Fe+Mg)$ oscila entre 0,186-0,218 y supera el valor máximo ($\leq 0,15$) sugerido por Ferry y Spear (1978) para la utilización de su calibración del geotermómetro granate-biotita, por lo que es necesario aplicar correcciones en biotita por los contenidos de Al^{VI} y fundamentalmente de Ti .

A pesar de que la técnica de microsonda no permite la medición de los contenidos de Fe_2O_3 , puede hacerse una estimación del estado de oxidación del Fe según el color que presentan las láminas de biotita en sección delgada (Guidotti 1984). Los tonos rojizos, además de indicar altos contenidos de Ti como se dijo anteriormente, sugieren bajos contenidos de Fe_2O_3 . Además, la asociación de biotita con ilmenita o grafito, como es el caso de las muestras analizadas, indica condiciones reductoras. Así, puede deducirse que los contenidos de Fe_2O_3 en las biotitas de las muestras CA-40 y SL-29 serían bajos. Esto es importante para realizar los cálculos termobarométricos, ya que puede considerarse al Fe total analizado como Fe^{2+} y no es necesario realizar correcciones por el contenido de Fe^{3+} .

Plagioclasa

La composición de la plagioclasa es muy uniforme en las distintas muestras, sin mayores variaciones entre los individuos de la matriz de la roca y los asociados a granate. Los contenidos de anortita son de 28-30% (con un máximo de 35% en un análisis en la muestra CA-40) y se pueden clasificar como oligo-

clasa en el límite con andesina. Los contenidos de albita son de 70-72%, con un valor mínimo de 63% para un análisis en la muestra CA-40. Los contenidos de ortoclasa son muy bajos (1-2%), típicos de las plagioclasas metamórficas. Las variaciones composicionales dentro de los granos son poco marcadas, aunque en general puede notarse una leve zonación inversa, con un aumento de 1-3% en el contenido de anortita hacia los bordes.

Interpretación de la química mineral

Como se dijo anteriormente, en muchos de los granates estudiados es común observar una zonación textural, con un núcleo poiquilítico con inclusiones frecuentemente orientadas de cuarzo, biotita, plagioclasa y minerales opacos, y un borde externo prácticamente sin inclusiones. El núcleo se interpreta como Grt₁ crecido durante un evento M1 con desarrollo de una foliación S₁ y el borde externo se interpreta como Grt₂ crecido durante el pico metamórfico M2. Esta zonación textural en granate no se ve reflejada en los perfiles químicos correspondientes, los que son bastante homogéneos. Esto se atribuye a la difusión en condiciones de alto grado que habrían experimentado los granates durante el pico M2, lo que habría obliterado las evidencias de zonación química producidas durante la etapa prógrada.

La única evidencia química que puede interpretarse como la preservación de una zonación por crecimiento en granate es el enriquecimiento en grosularia en la zona del núcleo del granate de la muestra CA-40. Ese patrón indicaría que las condiciones de presión durante el evento M1 habrían sido más altas que durante el evento M2. Otra evidencia de un descenso de la presión del evento M1 al M2 es la presencia de rutilo en núcleos de granate (Grt₁), mientras que el mineral de titanio estable con el Grt₂ en la matriz de la roca es ilmenita (Guereschi 2000; Guerreschi y Martino, en prensa).

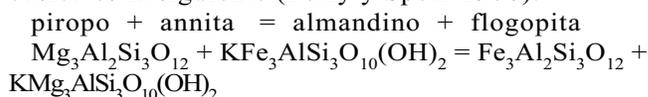
En general, los granates exhiben grados variables de resorción, con bordes engolfados y contornos irregulares. En el caso de la muestra CA-40, esos rasgos texturales tienen su correlato en los perfiles composicionales de granate, los que muestran un fuerte incremento en el contenido de Fe (almandino) y menor en Mn (espesartina) hacia los bordes, acompañados por una disminución en Mg (piropo). Esa resorción parcial habría sido producida por enfriamiento durante las etapas retrógradas posteriores al pico metamórfico M2.

Geotermobarómetros utilizados

A continuación, se describirán brevemente las características de los geotermómetros y geobarómetros utilizados en este trabajo.

Geotermómetro granate-biotita

El intercambio Fe-Mg en el par granate-biotita es uno de los geotermómetros más comúnmente usados, debido a su aplicación en una gran variedad de rocas y dentro de un amplio rango de grados metamórficos. Existen numerosas versiones de este termómetro, ya sea calibradas mediante observaciones de campo, experimentos de laboratorio o calibraciones experimentales que usan diferentes modelos de mezcla no ideal para granate y biotita. La reacción de equilibrio básica es la siguiente (Ferry y Spear 1978):



El uso de esta calibración está restringido a composiciones de granate con bajos contenidos de Ca y Mn $[(\text{Ca}+\text{Mn})/(\text{Ca}+\text{Mn}+\text{Fe}+\text{Mg}) \leq 0,2]$ y para biotitas con bajos contenidos de Al^{VI} y Ti $[(\text{Al}^{\text{VI}}+\text{Ti})/(\text{Al}^{\text{VI}}+\text{Ti}+\text{Fe}+\text{Mg}) \leq 0,15]$.

Calibraciones posteriores de este termómetro tuvieron en cuenta el efecto de componentes adicionales en la solución sólida, como Ca y Mn en granate o Al^{VI} y Ti en biotita. Sin embargo, la magnitud de los efectos de las impurezas sobre el intercambio Fe-Mg entre granate y biotita, así como la presencia de Fe³⁺, aún no son lo suficientemente conocidas y siguen siendo temas de discusión. Esto hace difícil la elección de una calibración entre todas las versiones disponibles para este geotermómetro.

En general, el termómetro Grt-Bt funciona bastante bien en rocas de la facies de anfibolitas y de la parte de alta temperatura de la facies de esquistos verdes. En la parte más alta de la facies de anfibolitas y en la facies de granulitas, generalmente ocurre intercambio retrógrado de Fe-Mg, por lo que se obtienen temperaturas anómalamente bajas si se analizan los bordes de granate y las biotitas en contacto con granate. Sin embargo, en rocas ricas en biotita, pueden obtenerse estimaciones razonables de temperaturas prógradas máximas usando la composición del núcleo del granate y la composición de la biotita de la matriz, suponiendo que estas dos composiciones minerales estuvieron alguna vez en equilibrio (Bucher y Frey 1994).

Geobarómetro granate-silicato de aluminio-cuarzo-plagioclasa (GASP)

Esta paragénesis es muy común en las metapelitas y es una de la más ampliamente usadas como geobarómetro para rocas en facies de granulitas y anfibolitas. Se fundamenta en el intercambio catiónico de Ca entre el componente grosularia del granate y el componente anortita de la plagioclasa (Newton y Haselton 1981). Hay numerosas calibraciones disponibles para este barómetro, aunque existen grandes incertidumbres. La reacción de miembros extremos es la siguiente:

1 grosularia + 2 silicato de aluminio + 1 cuarzo = 3 anortita



Esta reacción ha sido calibrada en el rango de temperatura de 900-1400°C, por lo que su aplicación a menor temperatura requiere una extrapolación bastante grande, lo que contribuye en gran proporción a las incertidumbres en la estimación de presión con este barómetro. Una desventaja es que este barómetro tiene cierta dependencia de la temperatura asumida. Otro problema es que generalmente los granates en asociaciones naturales contienen cantidades muy pequeñas del componente grosularia.

Geobarómetro granate-rutilo-silicato de aluminio-ilmenita-cuarzo (GRAIL)

Este es otro barómetro utilizado frecuentemente en rocas en facies de granulitas y surge de la siguiente reacción:

3 ilmenita + sillimanita + 2 cuarzo = almandino + 3 rutilo



Este sistema fue calibrado por Bohlen *et al.* (1983) y es uno de los mejores barómetros disponibles para metapelitas de alto grado, ya que tiene varias ventajas: (1) fue calibrado dentro del rango P-T para el cual será generalmente usado, por lo no son necesarias grandes extrapolaciones; (2) su localización es bastante insensible a la temperatura; (3) sólo una fase (granate) o a lo sumo dos (granate e ilmenita) muestran solución sólida significativa en rocas metamórficas ordinarias; y (4) en granate e ilmenita se analizan sus componentes mayoritarios, por lo que no se requieren grandes extrapolaciones composicionales. Además, en ausencia de rutilo, este barómetro puede ser usado para estimar un límite de presión superior.

Geotermobarometría de las muestras analizadas

En este trabajo, de acuerdo con las características de las distintas calibraciones disponibles y los rangos de composición de los minerales analizados, se seleccionó para el geotermómetro granate-biotita la calibración de Holdaway *et al.* (1997), por ser una de las calibraciones más modernas y completas, ya que revisa y mejora las correcciones de calibraciones anteriores. Para el geobarómetro granate-plagioclasa-silicato de aluminio-cuarzo (GASP) se utilizó la calibración de Koziol (1989), con sillimanita.

A manera de control, se realizó también el cálculo de las curvas del coeficiente de distribución (K_D) del geobarómetro GRAIL (granate-rutilo-silicato de aluminio-ilmenita-cuarzo) usando los valores de almandino en granate medidos para cada muestra e ilmenita pura, ya que con frecuencia la ilmenita en muestras natura-

les similares se aproxima a la composición ideal FeTiO_3 . Como las muestras analizadas no poseen rutilo, el valor obtenido con este barómetro sería un indicador de presión máxima.

Para los cálculos termobarométricos se seleccionaron puntos de granate de su zona intermedia, es decir, puntos alejados del núcleo que podrían representar las condiciones en eventos metamórficos previos de la etapa prógrada (M1), a pesar de la fuerte homogeneización sufrida, y puntos hacia dentro del borde externo modificado del granate para evitar efectos retrógrados. En el caso de biotita y plagioclasa, se utilizaron las composiciones en la matriz de la roca, alejadas de granate. Para rocas de alto grado como las analizadas, se considera que esos valores son la mejor aproximación posible a las composiciones minerales en equilibrio durante el pico metamórfico M2. Los valores promedios para cada muestra se muestran en el Cuadro 1.

Las series de inclusiones de plagioclasa en las distintas zonas del granate son muy útiles en geobarometría. Sin embargo, cuando no hay inclusiones en granate o éstas son pocas y dispersas, la interpretación de la historia de reacción debe basarse en esas pocas inclusiones o en la zonación de la plagioclasa de la matriz. En este trabajo, como no se dispone de análisis de inclusiones de plagioclasa en granate, en la muestra CA-40 se realizaron los cálculos geobarométricos con los valores del interior y borde de la plagioclasa de la matriz.

Diagrama AFM

Se utilizó la proyección AFM para rocas pelíticas con el sistema KFMASH (K_2O -FeO-MgO- Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O), proyectada desde el feldespato potásico (rocas de alto grado, sin muscovita), con cuarzo en exceso. Fueron proyectados los valores de granate y biotita utilizados

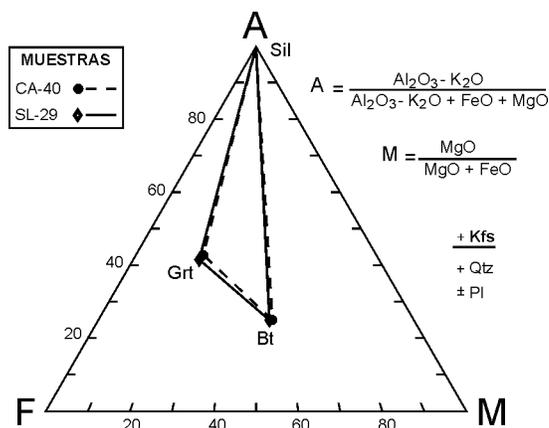


Figura 4: Diagrama AFM proyectado desde feldespato potásico mostrando las composiciones de granate y biotita empleadas en los cálculos termobarométricos, con la paragénesis Grt + Bt + Sil.

para los cálculos termobarométricos (Cuadro 1), considerados en equilibrio durante el pico metamórfico M2. Los valores del parámetro A (Fig. 4) son casi iguales en ambas muestras, tanto para granate (0,42-0,43) como para biotita (0,25), ya que no muestran variaciones por efecto de la sustitución *tschermak* (intercambio $2\text{AlSi}_{-1}\text{Mg}_{-1}$), paralela al eje binario AM. Lo mismo ocurre con los valores del parámetro M (0,27-0,28 para granate y 0,54-0,55 para biotita), que prácticamente no muestran sustitución Fe-Mg (intercambio FeMg_{-1}) paralela al eje binario FM. La pendiente de las líneas de conjugación de granate y biotita revela la partición de Fe y Mg entre ambos minerales en cada muestra. La paragénesis representada es $\text{Grt} + \text{Bt} + \text{Sil}$ (campo de tres fases coexistentes).

Resultados obtenidos

A continuación se indican los resultados obtenidos de la intersección de los valores medios de los geotermómetros y geobarómetros correspondientes a cada muestra, los que son representados en la figura 5. El detalle de los cálculos termobarométricos realizados puede encontrarse en Guerreschi (2000, Anexo II).

Muestra CA-40: La intersección de las curvas del termómetro Grt-Bt y del barómetro GASP (Fig. 5a) da una temperatura de 784°C y una presión de 7,9-8,2 kb (borde e interior de plagioclasa de la matriz). Utilizando el barómetro GRAIL como control, se obtienen valores similares de temperatura (780°C) y valores de presión inferiores (7,3 kb).

Muestra SL-29: La intersección de las curvas correspondientes al termómetro Grt-Bt y el barómetro GASP (Fig. 5b) da una temperatura de $768,7^{\circ}\text{C}$ y una presión de 7,7 kb. Los cálculos con el barómetro

GRAIL dan valores similares de temperatura ($767,4^{\circ}\text{C}$) y valores de presión levemente inferiores (7,4 kb).

Interpretación

Los resultados obtenidos para las muestras CA-40 y SL-29 son consistentes entre sí y dan valores análogos de presión y temperatura para los distintos geotermobarómetros utilizados, con un rango de temperatura de $768\text{-}784^{\circ}\text{C}$ y un rango de presión de 7,7-8,2 kb (promedios de 776°C y 7,9 kb) para el pico metamórfico M2. Esos valores superan la curva de fusión parcial del granito y son compatibles con el desarrollo de la paragénesis de alto grado en rocas pelíticas: $\text{Qtz} + \text{Pl} + \text{Bt} + \text{Grt} + \text{Sil} \pm \text{Kfs}$ y con el reconocimiento de estructuras migmatíticas de tipo estromatítico en gran parte del área.

Las condiciones calculadas son intermedias entre datos obtenidos al sur del área estudiada ($33^{\circ} 10' \text{LS}$, 740°C y 6,8 kb, Otamendi *et al.* 2000) y al norte de la misma ($32^{\circ} 00' \text{LS}$, 800°C y 8 kb, Martino *et al.* 1994; $800 \pm 50^{\circ}\text{C}$ y $7,8 \pm 0,5$ kb, Demichelis *et al.* 1998; $650\text{-}950^{\circ}\text{C}$ y 7-8 kb, Otamendi *et al.* 1999). Esos datos indican regionalmente para la sierra de Comechingones un leve ascenso combinado de temperatura y presión en dirección NNE para el pico metamórfico M2. Considerando las sierras de Córdoba los valores máximos se hallarían en el extremo SSE (Grupo Yacanto, Martino *et al.* 1995) de una faja metamórfica regional, de aproximadamente 100 km de largo, extendida hacia el NNO (Macizo de San Carlos), donde aflorarían niveles más someros (Gordillo 1984, Martino *et al.* 1994).

Los valores calculados para el evento M2 indican condiciones metamórficas típicamente barrovianas, o de presión intermedia, durante el clímax de la colisión

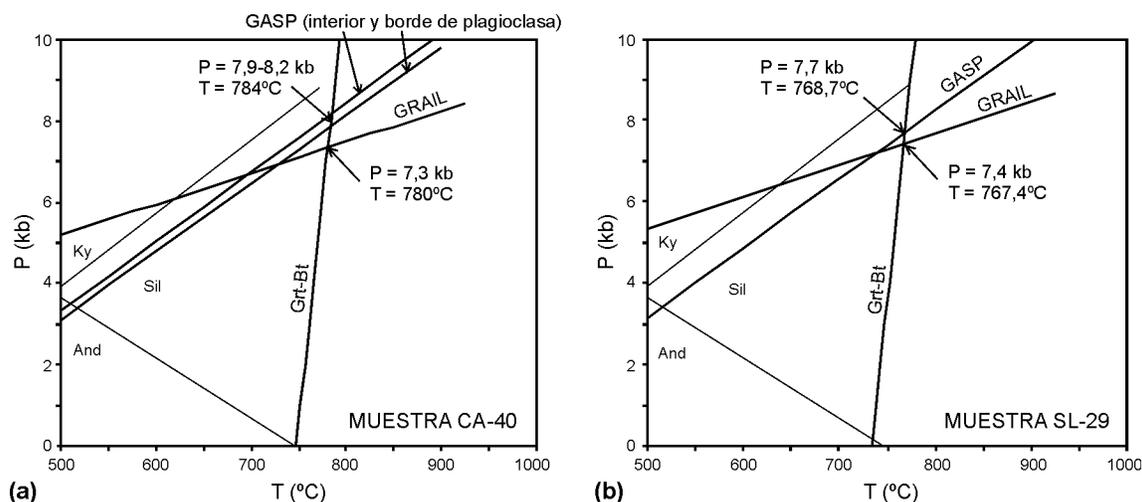


Figura 5: Geotermobarometría de las muestras analizadas, con la proyección de las curvas calculadas del termómetro granate-biotita (Grt-Bt) y del barómetro granate-plagioclasa-sillimanita-cuarzo (GASP) para las muestras CA-40 (a) y SL-29 (b). A manera de control se proyectan las curvas calculadas para el barómetro granate-rutilo-sillimanita-ilmenita-cuarzo (GRAIL) empleando los contenidos de almandino de las muestras respectivas e ilmenita pura.

del *terrane* Pampia con el margen occidental de Gondwana (coordenadas actuales), que habría ocurrido hacia el fin de la Orogenia Pan-Africana a los 520-530 Ma (Stuart-Smith *et al.* 1996, Rapela *et al.* 1998).

Conclusiones

Se aplicó termometría Grt-Bt y barometría GASP, complementada con barometría GRAIL, a la paragénesis Qtz + Pl + Bt + Grt + Sil de los gneises biotíticos granatíferos (\pm sillimaníticos) del sector centro oriental de la sierra de Comechingones. Se obtuvieron promedios de temperaturas de 776°C y presiones de 7,9 kb para el evento metamórfico principal M2. Estos resultados son compatibles tanto con los equilibrios de fases minerales observados como con la naturaleza migmatítica de gran parte del área. Los valores calculados para el pico metamórfico M2 indican condiciones metamórficas típicamente barrovianas durante el clímax de la colisión del *terrane* Pampia con el margen occidental de Gondwana, que habría ocurrido hacia el fin de la Orogenia Pan-Africana a los 520-530 Ma.

Agradecimientos

Los autores agradecen al CONICET el apoyo prestado durante todos estos años y a la SECyT (UNC). Los análisis químicos fueron realizados por los Dres. Bárbara Munn y Roberto Martino durante la estadía de éste último (Becario Externo, CONICET) como Profesor Visitante en el *Virginia Polytechnic Institute and State University* sito en Blacksburg, Virginia (Estados Unidos). Se agradece la asistencia técnica con la microsonda del Sr. Tod Solberg. Este trabajo es parte de la Tesis Doctoral de A. Guereschi.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Bence, A.E. and Albee, A.L., 1968. Empirical correction factors for the electron microanalysis of silicates and oxides. *Journal of Geology*, 76: 382-403.
- Bohlen, S.R., Wall, V.J. and Boettcher, A.L., 1983. Experimental investigations and geological applications of equilibria in the system FeO-TiO₂-Al₂O₃-SiO₂-H₂O. *American Mineralogist*, 68: 1049-1058.
- Bucher, K. and Frey, M., 1994. Petrogenesis of metamorphic rocks. 6th. Edition, Complete Revision of Winkler's Textbook. Springer-Verlag, 318 p., Berlín.
- Chincarini, A., Martino, R.D. y Guereschi, A.B., 1998. Origen alóctono del gabro del Cerro San Lorenzo, sierra de Comechingones, Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 53 (4): 435-444.
- Demichelis, A.H., Otamendi, J.E., Rabbia, O.M. and Patiño Douce, A.E., 1998. Thermobarometry of basic plutons and their country rocks, from Athos Pampa area, sierra de Comechingones, Córdoba. 10° Congreso Latinoamericano de Geología y 6° Congreso Nacional de Geología Económica, Actas 2: 351, Buenos Aires.
- Ferry, J.M. and Spear, F.S., 1978. Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 66: 113-117.
- Gordillo, C.E., 1984. Migmatitas cordieríticas de la sierra de Córdoba; condiciones físicas de la migmatización. *Academia Nacional de Ciencias, Miscelánea* 68: 1-40, Córdoba.
- Guereschi, A.B., 1992. Petrografía y caracterización química de las rocas ígneas y metamórficas del borde centro-oriental de la sierra de Comechingones, departamento Calamuchita, provincia de Córdoba. Trabajo Final, Hemeroteca del Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, 140 p. (Inédito).
- Guereschi, A.B., 2000. Estructura y petrología del basamento metamórfico del flanco oriental de la sierra de Comechingones, pedanías Cañada de Alvarez y Río de Los Sauces, departamento Calamuchita, provincia de Córdoba. Tesis Doctoral en Ciencias Geológicas, Hemeroteca de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, 196 p. y Anexos (47 p., 3 mapas). (Inédito).
- Guereschi, A.B. y Baldo, E.G., 1993. Petrología y geoquímica de las rocas metamórficas del sector centro-oriental de la sierra de Comechingones. *Actas 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos*, 4: 319-326, Mendoza.
- Guereschi, A.B. y Martino, R.D., 1998. Las migmatitas estromatíticas de Huerta Vieja, sierra de Comechingones, Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 53 (1): 101-116.
- Guereschi, A. B. y Martino R.D. Trayectoria textural de las metamorfitas del sector centro-oriental de la sierra de Comechingones, Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* (en prensa).
- Guidotti, C.V., 1984. Micas in metamorphic rocks. In: Ribbe, P.H. (Ed.): *Micas. Reviews of Mineralogy*, 13: 357-468. Mineralogical Society of America.
- Holdaway, M.J., Mukhopadhyay, B., Dyar, M.D., Guidotti, C.V. and Dutrow, B.L., 1997. Garnet-biotite geothermometry revised: New Margules parameters and a natural specimen data set from Maine. *American Mineralogist*, 82: 582-595.
- Koziol, A.M., 1989. Recalibration of the garnet-plagioclase-Al₂SiO₅-quartz (GASP) geobarometer and applications to natural paragenesis. *EOS*, 70: 493.
- Kretz, R., 1983. Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 68: 277-279.
- Le Breton, N. and Thompson, A.B., 1988. Fluid-absent (dehydration) melting of biotite in metapelites in the early stages of crustal anatexis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 99: 226-237.
- Martino, R.D., Munn, B., Kraemer, P., Escayola, M. and Guereschi, A.B., 1994. Thermobarometry at 32° 00' S in the Pampean Ranges of Córdoba, Argentina. *GSA Abstracts with Programs*, pp. A-226. Seattle, U.S.A.
- Martino, R.D., Kraemer, P.E., Escayola, M.P., Giambastiani, M. y Arnosio, M., 1995. Transecta de las sierras Pampeanas de Córdoba a los 32° LS. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 50 (1-4): 60-77.
- Martino, R.D., Guereschi, A.B. y Giambastiani, M., 1997. El sinforme de la sierra Blanca: petrología y evolución estructural, sierra de Comechingones, Córdoba, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 52 (2): 143-156.
- Newton, R.C. and H.T. Haselton, 1981. Thermodynamics of garnet-plagioclase-Al₂SiO₅-quartz geobarometer. In: Newton, R.C., A. Navrotsky and B.J. Wood (Eds.): *Thermodynamics of minerals and melts*, p. 131-147. Springer-Verlag, Nueva York.
- Otamendi, J.E., Patiño Douce, A.E. and Demichelis, A.H., 1999. Amphibolite to granulite transition in aluminous greywackes from the sierra de Comechingones, Córdoba, Argentina. *Journal of Metamorphic Geology*, 17: 415-434.
- Otamendi, J.E., Fagiano, M.R. y Nullo, F.E., 2000. Geología y evolución metamórfica del Complejo Monte Guazú, sur de la sierra de

- Comechingones, provincia de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 55 (3): 265-279.
- Rapela, C.W., Pankhurst, R.J., Casquet, C., Baldo, E., Saavedra, J., Galindo, C. and Fanning, C.M., 1998. The Pampean Orogeny of the southern proto-Andes: Cambrian continental collision in the sierras de Córdoba. In: Pankhurst, R.J. and Rapela, C.W. (Eds.), *The Proto-Andean Margin of Gondwana. Special Publications*, 142: 181-217. Geological Society, Londres.
- Spear, F.S., 1993. *Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths. Monographs Series*, Mineralogical Society of America, 799 p. Washington.
- Spear, F.S. y Kohn, M.J., 1999. *Program Thermobarometry. Versión 2.1 para computadoras Macintosh. Manual de uso*, 42 p.
- Stuart-Smith, P., Miró, R., Pieters, P., Lyons, P., Sims, J. y Camacho, A., 1996. *Estructura tectónica de las sierras Pampeanas Australes, Argentina. Australian Geological Survey Organisation*, 4 p., Camberra, Australia.
- Winkler, H.G.F., 1979. *Petrogenesis of metamorphic rocks. Springer-Verlag*, 348 p., Nueva York.

Recibido: 30 de abril, 2001

Aceptado: 10 de diciembre, 2002