

Geoquímica y metalogénesis de las pegmatitas y granitos asociados del sector sur del distrito Comechingones, Córdoba

Manuel DEMARTIS¹, Eugenio ARAGÓN², Jorge E. CONIGLIO³, Lucio P. PINOTTI¹, Fernando J. D'ERAMO¹, Leonardo A. AGULLEIRO INSÚA³, María Natalia MAFFINI¹ y Hugo A. PETRELLI³

Resumen: El distrito pegmatítico Comechingones, ubicado en el faldeo oriental de la sierra homónima, en la provincia de Córdoba, involucra pegmatitas graníticas correspondientes a la clase de Elementos Raros, tipo berilo, subtipo berilo-columbita-fosfatos, algunas en transición a la clase muscovítica, con mineralizaciones de Be-Nb-Ta-U y minerales industriales. Dos tipos de pegmatitas graníticas han sido descritas en el sector sur del distrito: pegmatitas tipo I, con tamaños que en total pueden alcanzar los 1000 metros de longitud y superar los 50 de ancho, internamente zonadas y portadoras de Be, Nb-Ta y U; y pegmatitas tipo II, de menores dimensiones, no zonadas, ricas en cuarzo de alta pureza, carentes de mineralizaciones metalíferas, y asociadas espacial y genéticamente con leucogranitos aplíticos. En este trabajo se presentan y discuten los datos geoquímicos preliminares de ambos tipos de pegmatitas y granitos asociados. Los datos geoquímicos obtenidos, apoyados con descripciones de campo y petrográficas, permiten establecer que las dos tipologías de pegmatitas corresponden a dos eventos magmáticos diferentes (muy probablemente diacrónicos). El primero generó las pegmatitas tipo I, las cuales de sur a norte presentan un aumento en el grado de fraccionamiento desde pegmatitas poco evolucionadas y sin mineralizaciones de elementos raros, hasta pegmatitas evolucionadas con depósitos metalíferos de interés económico. El segundo evento dio origen a las pegmatitas tipo II y a los granitos aplíticos, y carece de especialización metalogénica, evidenciado por los indicadores de diferenciación magmática sistemáticamente inferiores a los de las pegmatitas tipo I y a la carencia de mineralizaciones metalíferas.

Abstract: *GEOCHEMICAL AND METALLOGENETICAL STUDY OF THE PEGMATITES AND ASSOCIATED GRANITES FROM SOUTHERN COMECHINGONES PEGMATITIC FIELD, CÓRDOBA.* The Comechingones pegmatitic field (CPF) is located in the eastern flank of the Sierra de Comechingones, Córdoba province. It is composed of granite pegmatites belonging to the Rare-Element class, beryl type, beryl-columbite-phosphate subtype; some of them are transitional into the Muscovite class. Beryllium, Nb, Ta and U deposits, as well as high-quality industrial mineral deposits, are frequently associated with these pegmatites. In the southern part of the CPF two different pegmatite types have been described. Type I pegmatites constitute large zoned bodies with up to 1000 m long and 50 m thick, and may constitute rare element deposits, whereas type II pegmatites occur as small, unzoned quartz-rich dykes, without metalliferous mineralizations, spatial and genetically associated with aplitic leucogranites. Preliminary geochemical data from both pegmatites types and granites are presented and discussed in this contribution. Geochemical evidences, supported by field and petrographic observations, suggest that the two types of pegmatites identified in the study area represent two different, probably diachronic, magmatic stages. Type I pegmatites display a geochemical gradation in a S-N direction, from barren pegmatites in the south to fractionated pegmatites in the northern part of the study area, and are the lithological product of the first magmatic stage. The second stage lead to the crystallization of aplitic granites and barren type II pegmatites, geochemically less fractionated than type II pegmatites.

Palabras Claves: Geoquímica. Metalogénesis. Pegmatitas LCT. Granitos. Distrito pegmatítico Comechingones. Sierras Pampeanas de Córdoba

Keywords: Geochemistry. Metallogenesis. LCT pegmatites. Granites. Comechingones pegmatitic field. Sierras Pampeanas de Córdoba.

¹) CONICET – Depto. Geología, Universidad Nacional de Río Cuarto. E-mail: mdemartis@exa.unrc.edu.ar, lpinotti@exa.unrc.edu.ar, fjderamo@exa.unrc.edu.ar, geonati02@hotmail.com

²) Universidad Nacional de La Plata – CONICET. E-mail: earagon@cig.museo.unlp.edu.ar

³) Depto de Geología, Universidad Nacional de Río Cuarto. E-mail: jconiglio@exa.unrc.edu.ar, leoagulleiro@gmail.com, hpetrelli@exa.unrc.edu.ar

Introducción

Si bien existen antecedentes en lo referido a la caracterización y descripción geológico-mineralógica-económica de las pegmatitas del distrito pegmatítico Comechingones (DPC), Sierras de Córdoba, hasta el momento se carece por completo de análisis químicos de las pegmatitas y granitos del distrito.

En trabajos previos realizados en el sector sur del DPC, se ha observado que las pegmatitas aflorantes poseen notables diferencias en cuanto a la yacencia, dimensiones, mineralizaciones, estructura interna y las condiciones físico-químicas de los fluidos mineralizadores (Demartis *et al.*, 2005; 2008; 2010a y b). A partir de estas observaciones se planteó un modelo de evolución que explica estas diferencias (Demartis, 2010). En el presente trabajo, se exponen los datos geoquímicos obtenidos a partir del muestreo de roca total y mineralógico sobre pegmatitas y granitos de la porción sur del DPC, los cuales aportan nuevas evidencias que apoyan fuertemente la hipótesis planteada en el modelo propuesto. Este modelo constituye una herramienta útil para la prospección tanto de minerales metalíferos como no metalíferos asociados con este tipo de rocas.

Distrito pegmatítico Comechingones

El DPC ocupa un área de aproximadamente 800 km², y se ubica en el sector noroccidental de la sierra homónima, dentro del ámbito de las Sierras Pampeanas de Córdoba (*Figura 1a y b*). Ha sido definido, caracterizado y clasificado por Galliski (1994, 1999), quien clasifica a las pegmatitas de este distrito dentro de la signatura geoquímica LCT, en la clase Elemento Raros, tipo berilo, subtipo berilo-columbita-fosfato, aunque algunas pegmatitas se consideran en transición a la clase Muscovita. Teniendo en cuenta el nuevo esquema de clasificación propuesto por Černý y Ercit (2005), estas pegmatitas poseen características correspondientes a la clase Muscovita-Elementos Raros. Hub (1994, 1995) distinguió cinco grupos pegmatíticos para todo el DPC, de norte a sur: grupos El Catre, Cerro de Agustín, Cerro Redondo, Cerro de las Ovejas y Cerro El Tren. Demartis (2010) agregó dos grupos en el sector sur del DPC: grupos Electra y Otto (*Figuras 1b y c*).

Las rocas hospedantes de las pegmatitas y granitos del sector sur del DPC están constituidas por gneises, migmatitas, anfibolitas y otros protolitos cámbricos que han sido afectados por la deformación de la faja de cizalla Guacha Corral (FCGC), desarrollada durante el ciclo Famatiniano, dando como resultado milonitas, proto y ultramilonitas (Martino *et al.*, 1995; Fagiano *et al.*, 2002; Whitmeyer y Simpson, 2003; Fagiano, 2007). Las pegmatitas y granitos del área de estudio se emplazaron sincinemáticamente con la deformación de la FCGC (Aguileiro Insúa *et al.* 2006; Demartis *et al.* 2011a).

En el área de estudio del presente trabajo, correspondiente a la porción sur del DPC (*Figura 1c*), se identificaron y describieron dos tipos de pegmatitas, tipo I y tipo II, sobre la base de sus morfologías, dimensiones, estructura interna, mineralizaciones, etc.

Las pegmatitas tipo I predominan en el sector occidental del área de estudio, y afloran en tres de los cuatro grupos pegmatíticos establecidos previamente para el área de estudio (*Figura 1c*): grupos Cerro de las Ovejas, Cerro El Tren y Electra. Poseen morfologías lenticulares a tabulares, y en general no superan los 200 m en su máxima extensión. Generalmente se presentan como conjuntos de pegmatitas conformando extensas corridas pegmatíticas que pueden superar los 1000 m de largo y 50 m de ancho, donde cada una de estas corridas está constituida internamente por varios cuerpos lenticulares de pegmatitas.

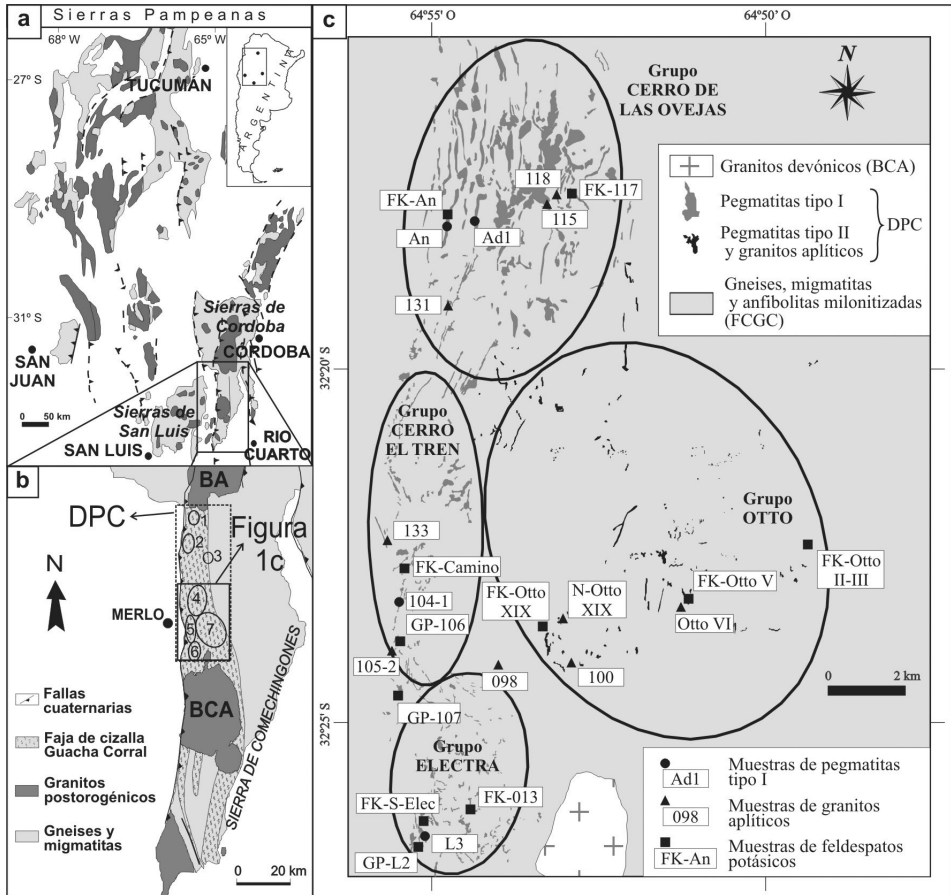


Figura 1. a) Bosquejo geológico simplificado de las Sierras Pampeanas Orientales, con la localización del recuadro correspondiente al mapa de la Figura 1b. b) Mapa geológico simplificado de la Sierra de Comechingones, mostrando la localización del distrito pegmatítico Comechingones (DPC) y del mapa de la Figura 1c. Los óvalos muestran la ubicación y extensión aproximada de los siete grupos pegmatíticos que conforman el DPC: 1) grupo El Catre; 2) grupo Cerro de Agustín; 3) grupo Cerro Redondo; 4) grupo Cerro de las Ovejas; 5) grupo Cerro El Tren; 6) grupo Electra; 7) grupo Otto. BA: batolito de Achala; BCA: batolito Cerro Áspero. c) Mapa geológico del área de estudio mostrando la ubicación de los muestreos para análisis geoquímicos con sus respectivos rótulos y tipos de muestreo (ver texto). Los óvalos muestran, nuevamente, la ubicación y extensión aproximada de los cuatro grupos pegmatíticos del área de estudio. FCGC: faja de cizalla Guacha Corral.

Cada pegmatita posee individualmente zonación interna, la cual está caracterizada, desde el exterior al interior, por una zona de borde discontinua (muscovita \pm cuarzo y albita), zona de pared de grano grueso (cuarzo + muscovita \pm albita), zona intermedia de grano grueso a muy grueso (microclino + cuarzo + muscovita + albita), y una zona de núcleo cuarzoso, con megacrístales de microclino y muscovita subordinados. En general la zona intermedia es ampliamente dominante volumétricamente sobre las demás, y en aquellas pegmatitas donde no se ha observado zonación interna, las mineralogías y texturas corresponden a las de las zonas intermedias. Entre los minerales accesorios pueden nombrarse granate, berilo, triplita (y sus productos de alteración secundaria), columbita-tantalita, y minerales de uranio, que se asocian generalmente a las zonas intermedias o núcleo. También poseen unidades

de reemplazo que afectan esencialmente a las zonas intermedias, y están compuestas de albita + lepidolita + turmalina + cuarzo + montebrasita + muscovita (Demartis *et al.*, 2011b). Este tipo de pegmatitas poseen mineralizaciones de Be, Nb-Ta y U, además de minerales industriales de alta calidad, tales como cuarzo, feldespato y micas. No obstante, las mineralizaciones metalíferas no ocurren uniformemente sino que se concentran mayormente en las pegmatitas del grupo Cerro de las Ovejas, al norte del área de estudio. Por su parte, las pegmatitas del grupo Cerro El Tren son en general estériles, con escasos ejemplos de mineralizaciones de berilo, mientras que las pegmatitas del grupo Electra carecen por completo de mineralizaciones metalíferas de interés. Se determinaron condiciones de presión y temperatura de formación de 5 kb y alrededor de 600°C para los cuarzos de núcleo de las pegmatitas tipo I (Demartis *et al.* 2010a).

Las pegmatitas tipo II no poseen zonación, son de dimensiones considerablemente menores (generalmente no superan los 150 m de corrida), presentan morfologías tabulares y no están mineralizadas. Se restringen esencialmente al sector oriental del área de estudio y afloran en el grupo Otto (*Figura 1*). Están compuestas, en gran medida, de cuarzo de alta pureza (>99,98 % de SiO₂; Demartis *et al.*, 2005 y 2009), en general con texturas macizas, aunque en algunos casos se han podido observar texturas crustiformes, y generalmente presentan variaciones de rumbo y buzamiento en armonía con la orientación de la roca hospedante. En los sectores de quiebres de rumbos se han descrito intercrecimiento de cuarzo con microclino y muscovita subordinados, con típicas texturas pegmatíticas, y también se observan granate y berilo como accesorios frecuentes. Las condiciones de presión y temperatura de formación estimadas para los cuarzos de las pegmatitas tipo II son de alrededor de 2,5 kb y 450°C (Demartis *et al.*, 2005 y 2010a).

Las pegmatitas tipo II se encuentran frecuentemente asociadas espacial y genéticamente a granitos aplíticos conformando asociaciones aplopegmatíticas. Estos granitos son leucocráticos y poseen morfologías tabulares, longitudes que varían desde escasos metros hasta unos pocos cientos de metros, potencias desde decímetros hasta 10 m, y presentan usualmente contactos concordantes y armónicos con la foliación milonítica de las rocas hospedantes. Mineralógicamente están compuestos de cuarzo, microclino, plagioclasa (~An₁₅), muscovita, con biotita y granate en menor proporción, además de circón, monacita y apatita como fases minerales accesorias.

Muestreo

En este trabajo, se efectuaron dos tipos de muestreos y análisis, cuya ubicación se presenta en la *Figura 1: 1*) muestreo para análisis geoquímico de roca total en pegmatitas tipo I y en granitos aplíticos, y 2) muestreo para análisis geoquímico de feldespatos potásicos en pegmatitas tipo I (correspondientes a las zonas de núcleo) y tipo II. Todos los análisis fueron realizados mediante ICP-MS e ICP-OES en el laboratorio comercial ACTLABS, Canadá.

El muestreo de roca total en pegmatitas se efectuó en las zonas intermedias de pegmatitas tipo I, debido a que estas zonas en la mayoría de los casos representan más del 75% de la superficie aflorante. Para la toma de estas muestras se seleccionaron aquellas pegmatitas donde las zonas intermedias superan el 90% de su superficie total aflorante y sus texturas no presentan heterogeneidades importantes. En cada punto se realizó un muestreo sistemático de esquirlas de roca fresca hasta totalizar por lo menos 30 kg por muestra. Los datos obtenidos de estos análisis se utilizaron esencialmente para efectuar comparaciones regionales dentro del área.

Geoquímica de roca total

Los valores de índices de saturación de alúmina (ISA) de los análisis geoquímicos de roca total de pegmatitas tipo I y granitos aplíticos son mayores a 1 (entre 1,21 y 1,73 para pegmatitas tipo I; y entre 1,37 y 1,62 para granitos aplíticos), indicando así un carácter netamente peraluminoso (Tabla 1). En cuanto a los elementos mayoritarios, tanto las pegmatitas tipo I y los granitos aplíticos están fuertemente empobrecido en CaO, MgO, Fe₂O₃ y TiO₂, poseen fuerte enriquecimiento en SiO₂ y álcalis (Na₂O y K₂O), y leve enriquecimiento en P₂O₅ (Tabla 1).

	Pegmatitas tipo I				Granitos aplíticos								
	An	L3	104-1	Ad1	N-Otto XIX	Otto VI	115	133	98	100	105-2	118	131
SiO ₂ óxidos (% peso)	74,99	76,46	77,28	76,98	77,72	76,44	76,39	76,27	75,67	75,08	78,21	75,56	75,56
Al ₂ O ₃	14,26	14,69	14,11	14,71	13,75	14,6	14,53	14,64	15,46	14,46	14,41	14,56	15,29
Fe ₂ O ₃ (T)	0,63	0,5	0,21	0,41	0,88	0,45	0,74	0,58	0,82	1	0,54	0,74	0,82
MnO	0,052	0,008	0,007	0,017	0,01	0,13	0,068	0,03	0,048	0,024	0,041	0,053	0,015
MgO	0,08	0,11	0,05	0,09	0,17	0,05	0,06	0,12	0,15	0,25	0,17	0,05	0,2
CaO	0,14	0,27	0,85	0,58	0,98	0,52	0,77	0,65	0,8	0,49	0,67	0,92	0,53
Na ₂ O	2,96	2,06	4,45	5,79	2,6	3,47	2,97	2,92	3,16	3,22	3,07	2,95	3,59
K ₂ O	4,08	4,11	2,61	1,24	2,47	3,5	2,67	2,61	3,43	3,56	2,38	3,8	2,81
TiO ₂	0,012	0,012	0,012	0,013	0,08	0,012	0,016	0,023	0,036	0,113	0,018	0,021	0,06
P ₂ O ₅	0,11	0,12	0,15	0,07	0,04	0,06	0,05	0,15	0,19	0,05	0,05	0,06	0,11
LOI	1,3	1,47	0,73	1,09	1,48	1,07	1,43	1,45	1,22	1,44	1,29	1,09	1,4
Total	98,62	99,79	100,5	101	100,2	100,3	99,71	99,44	101	99,69	100,9	99,81	100,4
ISA	1,49	1,76	1,21	1,23	1,57	1,4	1,58	1,66	1,49	1,44	1,63	1,37	1,54
Rb ppm	380	105	64	84	70	113	105	83	127	110	89	96	84
Cs	7,6	2,9	1,3	6,6	1,8	0,9	1	2	2,6	4,4	1,8	0,6	1,8
Ba	< 3	144	56	9	387	23	193	62	137	413	64	393	141
Sr	3	37	60	13	82	9	32	41	38	103	28	70	38
Be	7	3	3	3	1	3	3	5	7	2	5	2	3
Nb	23,3	3	2	7	8,4	16,1	11,5	6,5	11	10	9	8	8
Ta	9,88	2,2	1,8	2,7	2,58	4,64	4,25	3,96	3,6	2,1	3,2	2,6	2,7
U	0,51	0,4	0,5	0,5	1,02	0,8	1,24	1,16	2,2	0,8	1,3	1,7	1,5
Li	23	6	6	10	15	2	3	6	8	26	6	3	7
K/Rb	89,1	324,9	338,5	122,5	292,9	257,1	211,1	261	224,2	268,7	222	328,6	277,7
K/Cs	4,457	11,765	16,667	1,560	11,391	32,283	22,165	10,833	10,952	6,717	10,976	52,576	12,960

Tabla 1. Análisis químicos de roca total de zonas intermedias de pegmatitas tipo I y granitos aplíticos.

ISA (Índice de Saturación de alúmina) = $[Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)]_{molar}$

Los elementos LILE (*large ione lithophile elements*), tales como Rb, Cs, Sr y Ba, así como las relaciones K/Rb, K/Cs y otras, constituyen los mejores indicadores de fraccionamiento en los granitos y pegmatitas del área de estudio. Estos indicadores también han sido aplicados exitosamente en otros ejemplos de Argentina y del mundo (Goad y Černý, 1981; Černý *et al.*, 1985; Da Silva *et al.*, 1995; Galliski *et al.*, 1997; Fuertes-Fuente y Martín-Izard, 1998; Quéméneur y Lagache, 1999; Alfonso *et al.*, 2003; Černý *et al.*, 2005; Sardi y Lozano Fernández, 2010).

En las Figuras 2a y b se presentan los valores de K/Rb y K/Cs vs. los contenidos de Rb y Cs de las pegmatitas tipo I y de los granitos aplíticos. Observando los resultados de los análisis de las pegmatitas tipo I, se advierten significativas diferencias, desde valores altos de K/Rb y K/Cs y bajos contenidos en Rb y Cs (muestra “104-1” y “L3”) en las pegmatitas ubicadas al sur del área de estudio, hasta comportamientos inversos en las

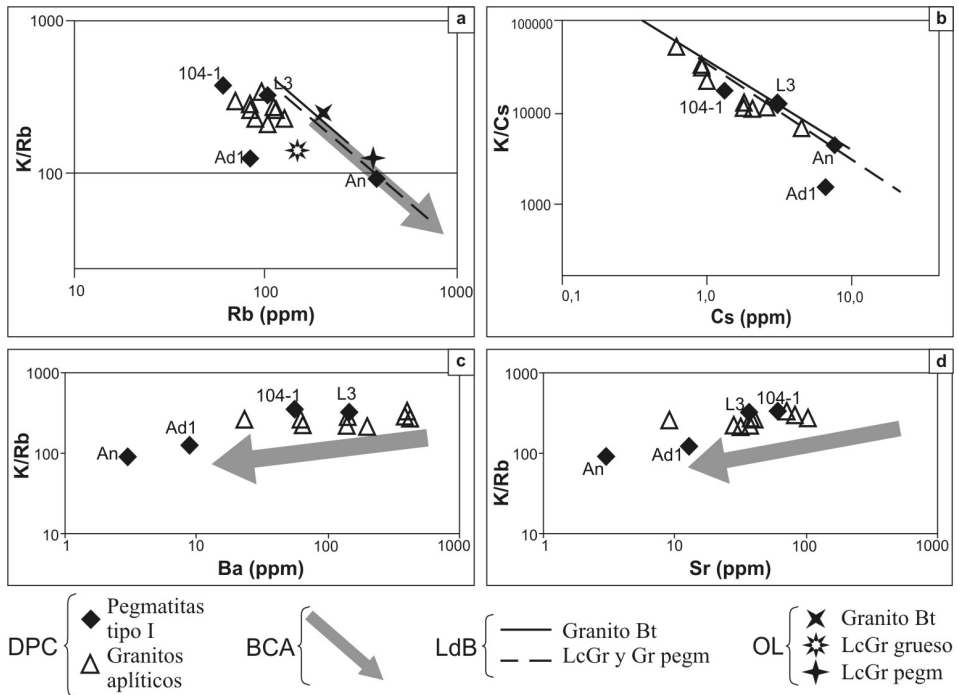


Figura 2. a) Gráfico K/Rb vs. Rb de pegmatitas tipo I y granitos aplíticos del área de estudio. Las flechas rellenas de colores grises muestran el tren evolutivo del Batolito Cerro Áspero (BCA) (Coniglio, 2006); se muestran también las facies del batolito de Lac du Bonnet (LdB), Manitoba, Canadá (Černý *et al.*, 1985); y las distintas facies del granito Osis Lake (OL), Manitoba, Canadá (Černý y Brisbin, 1982). **b)** Gráfico K/Cs vs. Cs de pegmatitas tipo I y granitos aplíticos del área de estudio. Se muestran también las facies del batolito de Lac du Bonnet (LdB), Manitoba, Canadá (Černý *et al.*, 1985). **c)** Gráfico K/Rb vs. Ba de pegmatitas tipo I y granitos aplíticos del área de estudio. **d)** Gráfico K/Rb vs. Sr de pegmatitas tipo I y granitos aplíticos del área de estudio. Los rótulos marcados en los gráficos corresponden a las muestras de pegmatitas tipo I, solamente.

muestras “An” y “Ad1”, correspondientes a las pegmatitas ubicadas al norte. Al comparar las zonas intermedias de las pegmatitas tipo I analizadas con otros ejemplos locales y mundiales de granitos y pegmatitas asociadas (batolito Cerro Áspero, Coniglio, 2006; y batolito Lac du Bonnet, Manitoba, Canadá, Černý *et al.*, 1985; *Figuras 2a y b*) se puede ver que, excepto la muestra “Ad”, el resto posee una buena correlación con los granitos del batolito Lac du Bonnet e inclusive con el tren evolutivo del batolito Cerro Áspero (Coniglio, 2006; Pinotti *et al.*, 2002).

Los granitos aplíticos poseen grados de fraccionamiento relativamente bajos, con bajos contenidos de Rb (entre 70 y 127 ppm) y Cs (entre 0,6 y 4,4 ppm), y altas relaciones K/Rb (entre 211 y 329) y K/Cs (entre 6.717 y 52.576). Esto concuerda ampliamente con las relaciones de yacencia que se observan en el campo y los datos geoquímicos que se presentan más adelante.

Los comportamientos observados para Ba y Sr son en general inversos a los de Rb y Cs, por lo tanto las concentraciones de Ba y Sr disminuyen a medida que aumenta el grado de fraccionamiento. Esto se debe a que son compatibles con los feldespatos que cristalizan a partir de un fundido granítico, e ingresan tempranamente en la estructura cristalina de estos minerales, empobreciendo gradualmente el líquido residual en estos elementos. En

las Figuras 2c y d se graficaron Ba y Sr en función del cociente K/Rb, donde se observa que las muestras “L3” y “104-1” de las pegmatitas tipo I ubicadas al sur del área de estudio poseen relativamente altos contenidos en Ba y Sr y mayores valores K/Rb con respecto a las muestras “An” y “Ad1” ubicadas al norte del área.

Los granitos aplíticos, por su parte, poseen contenidos en Ba y Sr superiores a las pegmatitas tipo I, lo cual es consistente con lo planteado para Rb y Cs. En general, las variaciones de los contenidos en Ba y Sr entre muestras de granitos aplíticos se correlacionan bastante bien con los contenidos de CaO, lo cual a su vez depende de la proporción de plagioclasa que cristaliza.

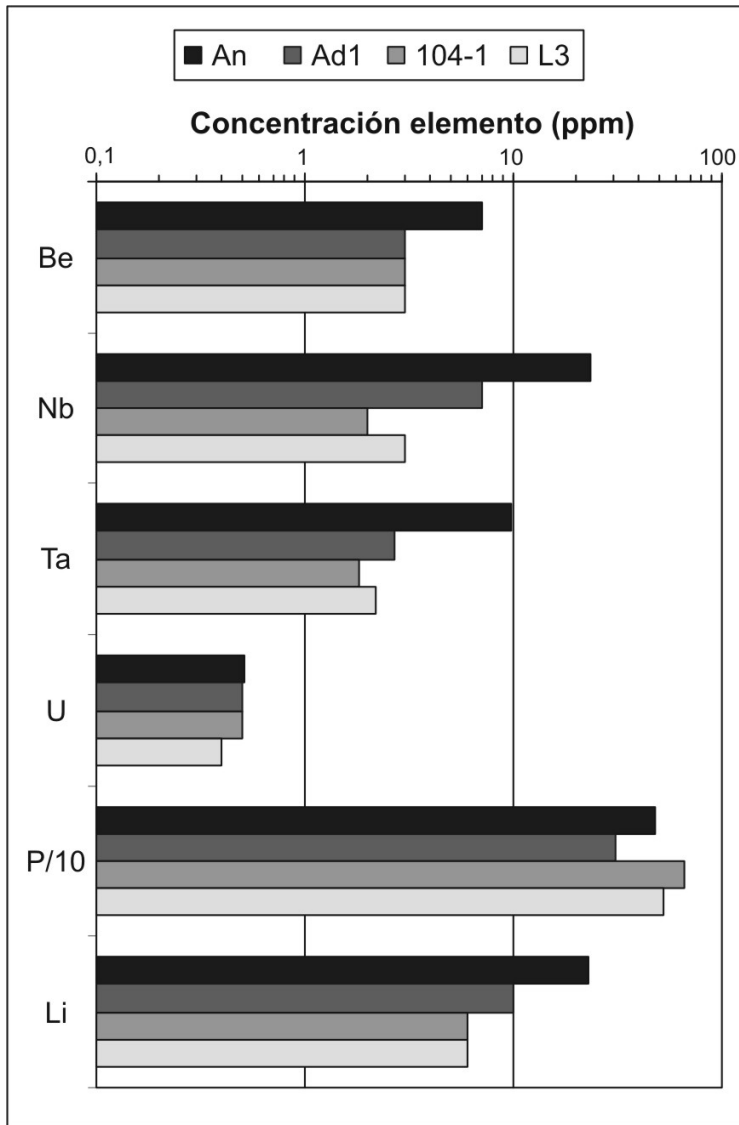


Figura 3. Gráfico de barras comparando los contenidos de Be, Nb, Ta, U, P y Li entre las cuatro muestras de zonas intermedias de pegmatitas tipo I.

En la *Figura 3* se muestran, de manera comparativa mediante un gráfico de barras, los contenidos relativos de Be, Nb, Ta, U, P y Li en las diferentes muestras de pegmatitas tipo I. En este gráfico, la mayoría de estos elementos muestran un enriquecimiento progresivo desde las muestras “L3” y “104-1”, ubicadas al sur del área de estudio, hasta las muestras “Ad1” y “An”, ubicadas al norte del área, donde ocurren los depósitos metalíferos más importantes. Lo contrario sucede con el U y el P, donde las muestras de pegmatitas ubicadas al sur del área de estudio muestran contenidos iguales o mayores a las del norte.

	Pegmatitas tipo I								Pegmatitas tipo II		
	FK-117	FK-An	FK-Camino	FK-S-Elec	FK-13	GP-L2	GP-106	GP-107	FK-Otto V	FK-Otto II-III	FK-Otto XIX
SiO ₂ óxidos (% peso)	65,97	65,42	65,14	65,51	65,07	72,18	71,71	73,21	65,36	65,18	65,93
Al ₂ O ₃	18,5	18,74	18,68	18,31	18,47	14,34	14,76	14,94	18,52	18,38	17,67
Fe ₂ O ₃ (T)	0,03	0,02	0,02	0,03	0,07	0,13	0,07	0,04	0,04	0,05	0,05
MnO	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,006	0,004	0,002	0,002	0,002
CaO	0,04	0,02	0,07	0,08	0,07	0,08	0,07	0,23	0,05	0,13	0,05
Na ₂ O	3,01	2,54	3,58	2,85	2,37	1,91	1,97	2,74	3,49	2,15	0,52
K ₂ O	11,84	12,53	11,23	12,08	13,18	10,16	9,8	8,92	11,42	12,37	14,96
P ₂ O ₅	0,21	0,41	0,45	0,14	0,15	0,11	0,1	0,09	0,22	0,17	0,08
LOI	0,21	0,22	0,05	0,13	0,23	0,24	0,22	0,3	0,05	0,34	0,01
Total	99,81	99,9	99,24	99,13	99,62	99,16	98,74	100,5	99,15	98,79	99,27
Or (%)	72	76,4	67,1	73,3	78,3	77,4	76,2	67,2	68,1	78,6	94,7
Ab (%)	27,8	23,5	32,5	26,3	21,4	22,1	23,3	31,4	31,6	20,8	5
An (%)	0,2	0,1	0,4	0,4	0,3	0,5	0,5	1,5	0,3	0,7	0,3
Rb ppm	874	1000	666	338	337	240	303	302	881	248	286
Cs	4,4	170	13,3	10,1	6,3	8,7	9,9	7,7	4,2	2,7	3,6
Sr	3	10	10	75	92	129	73	80	7	149	90
Ba	14	6	20	189	410	574	241	261	14	325	612
Ga	14	17	9	7	8	6	6	7	24	7	11
K/Rb	112,5	104	140	296,7	324,7	351,4	268,5	245,2	107,6	414,1	434,2
K/Cs	22.338	612	7.009	9.929	17.367	9.695	8.218	9.617	22.572	38.033	34.497

Tabla 2. Análisis químicos de feldespatos potásicos de zonas de núcleo de pegmatitas tipo I, y feldespatos potásicos de pegmatitas tipo II.

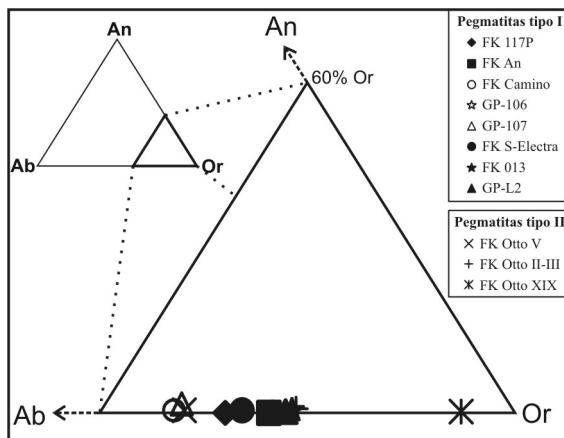


Figura 4. Diagrama Ab-An-Or de los feldespatos potásicos de pegmatitas tipo I y II, calculados a partir de análisis químicos en base a 8 oxígenos.

Geoquímica de feldespatos potásicos

Los feldespatos potásicos de las pegmatitas tipo I y II analizados poseen en general texturas perfiticas, y composicionalmente corresponden a feldespatos alcalinos, con contenidos de An despreciables (generalmente $<1\%$), cuyas composiciones varían entre $Or_{79}Ab_{21}$ y $Or_{67}Ab_{33}$ (Tabla 2 y Figura 4). La muestra "FK-Otto XIX" constituye un caso particular, ya que presenta un enriquecimiento extremo en el componente Or, con composición $Or_{95}Ab_5$. Si bien no se observa una diferencia marcada en las composiciones de los feldespatos de pegmatitas tipo I y pegmatitas tipo II, las pegmatitas tipo I tienen en general mayores contenidos en Ab y menores en Or con respecto a la tipo II. Asimismo, no se pudo establecer claramente una tendencia en los contenidos de Ab y Or entre las diferentes muestras de feldespatos de pegmatitas tipo I.

En las Figuras 5a y b se grafican los valores de K/Rb y K/Cs vs. los contenidos de Rb y Cs de los feldespatos potásicos de las pegmatitas tipo I y tipo II, utilizados como indicadores de fraccionamiento. En este gráfico se observa que los feldespatos de las pegmatitas tipo I poseen relativamente mayores contenidos de Rb y menores relaciones K/Rb con respecto a los de las pegmatitas tipo II, excepto el caso de la muestra "Otto V", correspondiente a feldespato potásico de una pegmatita tipo I situada en el grupo Otto. A su vez, si se evalúan solamente las pegmatitas tipo I, se puede observar un incremento de los contenidos de Rb y una disminución de K/Rb desde las muestras "GP-L2", "FK-S-Elec" y "FK-013", ubicadas al sur del área de estudio (grupo Electra, Figura 1), hasta las muestras "FK-117" y "FK-An", ubicadas al norte del área, en el grupo Cerro de las Ovejas (Figura 1). Estos datos indican que las pegmatitas tipo I poseen mayor grado de fraccionamiento con respecto a las pegmatitas tipo II, y dentro de las pegmatitas tipo I el grado de fraccionamiento aumenta en sentido sur-norte. Si se comparan los feldespatos de las pegmatitas I y II del área con los feldespatos potásicos en granitos de otros sectores del mundo (granitos de diversos sectores de Australia, y el granito de Galway, Irlanda) y con feldespatos potásicos en pegmatitas con diferentes grados de evolución (pegmatitas de los grupos Shatford Lake, Greer Lake, Red Cross Lake y la pegmatita Tanco, en el estado de Manitoba, Canadá; tomados de Černý *et al.*, 1985), graficados en la Figura 5a y b, puede observarse una clara correspondencia de las pegmatitas en estudio con respecto a las pegmatitas con bajo grado de evolución o poco fraccionamiento y a granitos parentales. En el extremo opuesto de los gráficos mostrados en las Figuras 5a y b, se encuentra la pegmatita "Tanco", ejemplo mundial de pegmatita altamente fraccionada de la clase Elementos Raros, tipo complejo, subtipo petalita, donde los valores de K/Rb y Rb se grafican bastante lejos del tren evolutivo de las pegmatitas en estudio.

En las Figuras 6a y b se grafican K/Rb vs. Cs y K/Cs vs. Rb, respectivamente, donde se muestran comparativamente los feldespatos potásicos de pegmatitas I y II, y los campos de pegmatitas de diferentes clases, tipos y subtipos, estériles y mineralizadas, definidos por Galliski *et al.* (1997) a partir muestras de feldespatos potásicos de zonas intermedias de pegmatitas de diferentes distritos de la Provincia Pegmatítica Pampeana. En ambas figuras, la mayoría de las muestras de feldespatos potásicos de las pegmatitas tipo I y II se graficaron en el campo que agrupa a pegmatitas de clase Muscovita o clase Elementos Raros estériles. Solamente la muestra "FK-An" se graficó en el campo correspondiente a pegmatitas de clase Elementos Raros, tipo Berilo y tipo Complejo, subtipo Espodumeno. Estos gráficos indican nuevamente que las pegmatitas del grupo Cerro de las Ovejas, ubicadas al norte del área de estudio, poseen un mayor grado de fraccionamiento, ya que, a diferencia del resto, se correlacionan con pegmatitas con mineralizaciones de elementos raros de la Provincia Pegmatítica Pampeana (Galliski *et al.*, 1997).

Comportamientos similares a los establecidos hasta el momento fueron observados también en el diagrama K/Rb vs. P_2O_5 (Figura 6c). Si bien la mayoría de las muestras (excepto las muestras “FK-Otto XIX” y “GP-107”) se grafican por encima del límite de 0,1% P_2O_5 , que separa las pegmatitas de clase Muscovita y estériles por debajo de las pegmatitas más evolucionadas por encima (Galliski *et al.*, 1997), las pegmatitas tipo II poseen valores significativamente menores en P_2O_5 que las pegmatitas tipo I. Entre las pegmatitas tipo I se observa nuevamente un aumento de P_2O_5 y menores valores de K/Rb en las pegmatitas de los grupos Cerro El Tren y Cerro de las Ovejas, al norte del área de estudio (muestras “FK-An”, “FK-117” y “FK-Camino”), con respecto a las pegmatitas del grupo Electra, ubicadas al sur (muestras “FK-S-Elec”, “FK-013”, “GP-L2”, “GP-106” y “GP-107”).

En la Figura 6d se relacionan los valores de Al/Ga vs. los contenidos de Ga. Debido a que, en rocas graníticas, el Ga normalmente ingresa en las estructuras cristalinas de aluminosilicatos sustituyendo al Al, la relación Al/Ga posee cierta relevancia para evaluar el grado evolutivo de una determinada suite de rocas (Černý *et al.*, 1985). En este gráfico feldespatos potásicos de pegmatitas tipo I muestran mayores concentraciones de Ga y menores valores de Al/Ga con respecto a los de las pegmatitas tipo II, y las mismas variaciones ocurren entre las pegmatitas tipo I del grupo Cerro de las Ovejas con respecto a las de los grupos Cerro el Tren y Electra, correspondiéndose con lo observado en los demás gráficos.

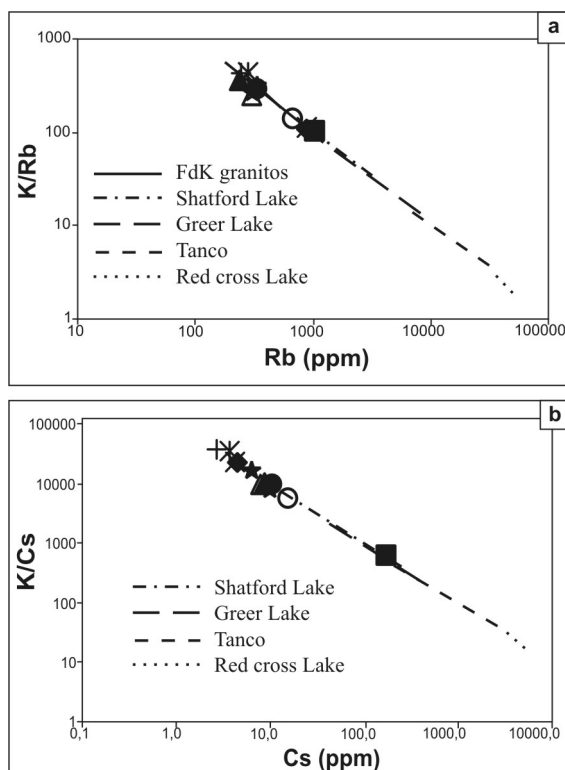


Figura 5. a) Gráfico K/Rb vs. Rb de feldespatos potásicos de pegmatitas tipo I y II. Se muestran también los datos de feldespatos potásicos de diversos granitos de Australia, del granito de Galway, Irlanda, y de feldespatos potásicos de distintas pegmatitas del estado de Manitoba, Canadá (tomados de Černý *et al.*, 1985). **b)** Gráfico K/Cs vs. Cs de feldespatos potásicos de pegmatitas tipo I y II. Se muestran también los datos de feldespatos potásicos de distintas pegmatitas (tomados de Černý *et al.*, 1985). Las leyendas son iguales a las de la Figura 4.

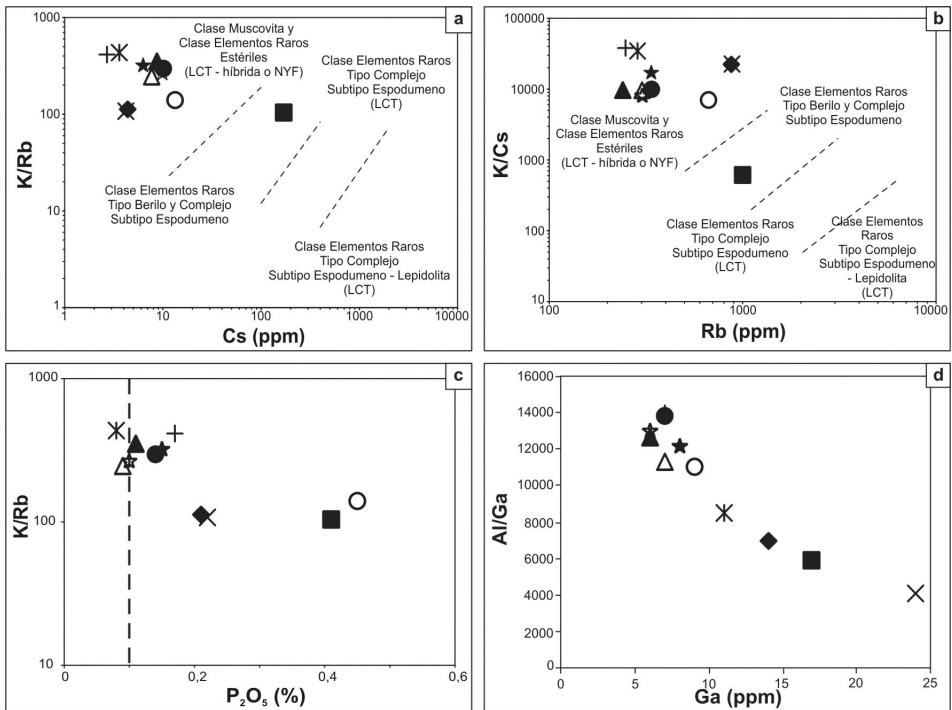


Figura 6. a) Gráfico K/Rb vs. Cs de feldspatos potásicos de pegmatitas tipo I y II. b) Gráfico K/Cs vs. Rb de feldspatos potásicos de pegmatitas tipo I y II. Tanto en la Figura 6a como 6b se muestran también los campos correspondientes a pegmatitas de diferentes clases, tipos y subtipos, estériles y mineralizadas, establecidos por Galliski *et al.* (1997) a partir de pegmatitas de diferentes distritos de la Provincia Pegmatítica Pampeana. c) Gráfico K/Rb vs. P_2O_5 de feldspatos potásicos de pegmatitas tipo I y II. Se muestra también un límite de 0,1% P_2O_5 establecido por Galliski *et al.* (1997), el cual separa los feldspatos de las pegmatitas de clase Muscovita y estériles a contenidos menores a 0,1% P_2O_5 de las pegmatitas más evolucionadas. d) Gráfico Al/Ga vs. Ga de feldspatos potásicos de pegmatitas tipo I y II. Las leyendas son iguales a las de la Figura 4.

Discusión y conclusiones

El incremento en el grado de fraccionamiento de las pegmatitas tipo I en sentido S-N, observado en las Figuras 2a, 2b, 5a y 5b, junto con las diferencias encontradas en los patrones de elementos de tierras raras (Demartís, 2010), se corresponde ampliamente con las características mineralógicas y metalogenéticas de los tres grupos de pegmatitas tipo I del área de estudio (de sur a norte, grupos Electra – Cerro El Tren – Cerro de las Ovejas). Las mineralizaciones metalíferas más importantes se localizan espacialmente en las pegmatitas del grupo Cerro de las Ovejas (el más septentrional y con mineralizaciones de Be, Nb-Ta y U, entre otros), geoquímicamente más fraccionadas (alto Rb y bajo K/Rb). Las pegmatitas menos fraccionadas (bajo Rb y alto K/Rb) corresponden a pegmatitas estériles o pegmatitas donde no se han encontrado mineralizaciones metalíferas importantes (grupo Electra). Las pegmatitas del grupo Cerro El Tren poseen mineralizaciones de elementos raros que constituyen un caso intermedio entre los dos grupos anteriores, lo cual se ve reflejado, por ejemplo, en el tren evolutivo de los feldspatos potásicos de la Figura 5a.

Los bajos contenidos en U y P, observados en la Figura 3, correspondientes a muestras de geoquímica de roca total en zonas intermedias de las pegmatitas del grupo Cerro de las

Ovejas, pueden explicarse mediante el fraccionamiento de fases minerales ricas en U y P (óxidos de U y fosfatos) que cristalizaron durante la formación de las zonas intermedias de pegmatitas tipo I. La cristalización de estos minerales, los cuales ocurren en masas de minerales distribuidos heterogéneamente en las zonas intermedias de las pegmatitas del grupo Cerro de las Ovejas, habría empobrecido relativamente el magma en estos elementos. Teniendo en cuenta que el muestreo de las pegmatitas tipo I se efectuó en sectores de las zonas intermedias que no incluyeron las masas de fosfatos ni minerales de U, es coherente encontrar bajos contenidos de estos elementos, ya que las muestras representarían el fundido relativamente deprimido en U y P. Por otra parte, los demás elementos de la *Figura 3* (Be, Nb, Ta, Li) son constituyentes estructurales esenciales de minerales accesorios que generalmente se asocian a las zonas de núcleo o unidades de reemplazo en las pegmatitas del grupo Cerro de las Ovejas (berilo y columbita-tantalita se observan frecuentemente asociados a cuarzo de núcleo, mientras que lepidolita y turmalina de Li-Na ocurren en unidades de reemplazo ricas en albita). Por lo tanto, si el muestreo representa el magma presente durante la cristalización de las zonas intermedias, previo a la cristalización de estos minerales, es razonable esperar mayores contenidos en las pegmatitas de este grupo con respecto a la de los grupos Cerro El Tren y Electra, tal como se observa en la *Figura 3*.

A partir de lo expuesto en el presente trabajo, se concluye que las diferentes tipologías de pegmatitas (pegmatitas tipo I y tipo II), aflorando conjuntamente dentro de la FCGC, podría ser explicada a partir de dos eventos magmático-pegmatíticos, con diferentes grados de fraccionamientos alcanzados.

El primer evento magmático generó las pegmatitas tipo I, y muestra, de sur a norte, un aumento en el grado de fraccionamiento desde pegmatitas no evolucionadas, con K/Rb mayores a 100, bajos contenidos de Cs y Rb, y sin mineralizaciones de elementos raros, hasta pegmatitas evolucionadas, con K/Rb menores a 100, altos contenidos de Cs y Rb, mineralizaciones de Be, Nb-Ta, U, y enriquecimiento tardío de Li y Na, a juzgar por la ocurrencia de las unidades de reemplazo.

El segundo evento magmático carece de especialización metalogenética, y dio origen a las pegmatitas tipo II. Sobre la base de relaciones de campo y modelado geoquímico (Demartis, 2010), se establece que los magmas parentales de estas pegmatitas están representados por los granitos aplíticos. La carencia de mineralizaciones de elementos raros de interés en las pegmatitas tipo II, junto con los altos valores de K/Rb de los feldespatos y de los granitos aplíticos, bajos contenidos de Rb y Cs, etc., son indicios de que este segundo evento magmático no alcanzó un grado de evolución semejante al del primero, por lo que sus productos pegmatíticos no poseen mineralizaciones de elementos raros.

Las diferencias geoquímicas observadas en este trabajo apoya la hipótesis planteada en trabajos previos (Demartis, 2010; Demartis *et al.*, 2010a; Demartis *et al.*, 2010b) mediante la cual se establece, a partir de evidencias de campo petro-estructurales y modelado de fluidos, que ambos tipos de pegmatitas son productos magmáticos originados a partir de dos eventos ocurridos a condiciones de P y T diferentes, en distintos momentos del desarrollo de la FCGC, bajo regímenes de deformación diferentes. Las evidencias texturales, mineralógicas, geoquímicas y estructurales, junto con aquellas observadas en el modelado de fluidos, permiten establecer que, a diferencia de las pegmatitas tipo I, las pegmatitas tipo II corresponderían a un evento ocurrido en niveles estructurales considerablemente superiores, y representarían la transición desde el estadio estrictamente pegmatítico al hidrotermal. La identificación y distinción de los tipos de pegmatitas trabajados y la formulación del modelo evolutivo de las pegmatitas del sector sur del DPC, constituye una herramienta fundamental

para la prospección de depósitos de minerales metalíferos y no metalíferos asociados con los distintos tipos de pegmatitas identificados.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Dr. Fernando Colombo por su exhaustiva e inestimable revisión del manuscrito. El presente trabajo ha sido realizado a partir de dos proyectos de investigación: PICT-1477 y PIP-CONICET N° 916, financiados por la ANPCyT y el CONICET, respectivamente; y a partir del programa PPI 18/C 360 (2009-2010), financiado por la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Río Cuarto.

Bibliografía

- Agulleiro Insúa, L., Demartis, M., D'Eramo, F., Pinotti, L. y Coniglio, J. 2006. Emplazamiento de leucogranitos y pegmatitas asociadas en la faja de cizalla Guacha Corral, Sa de Comechingones, Córdoba. *XIII Reunión de Tectónica*, San Luis, Pág. 11. (Publicación únicamente en CD-ROM).
- Alfonso, P., Melgarejo, J.C., Yusta, I. y Velasco, F. 2003. Geochemistry of feldspars and muscovite in granitic pegmatites from the Cap de Creus Field, Catalonia, Spain. *The Canadian Mineralogist*, 41: 103-116.
- Černý, P. y Brisbin, W.C. 1982. The Osis Lake pegmatitic granite, Winnipeg River District, southeastern Manitoba. En: P. Černý, (Ed.), *Granitic pegmatites in Science and Industry. Mineralogical Association of Canadá, Short Course Handbook*, 8: 545-555.
- Černý, P. y Ercit, T.S. 2005. The classification of granitic pegmatites revisited. *The Canadian Mineralogist*, 43: 2005-2026.
- Černý, P., Masau, M., Goad, B.E. y Ferreira, K. 2005. The Greer Lake leucogranite, Manitoba, and the origin of lepidolite-subtype granitic pegmatites. *Lithos*, 80: 305-321.
- Černý, P., Meintzer, R.E. y Anderson, A. J. 1985. Extreme fractionation in rare-element granitic pegmatites: selected examples of data and mechanisms. *The Canadian Mineralogist*, 23: 381-421.
- Coniglio, J.E. 2006. [Evolución petrológica y metalogenética del batolito Cerro Áspero en relación con el ciclo geoquímico endógeno del flúor. *Sierra de Comechingones, Córdoba*. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Río Cuarto, 170 pp. Inédito].
- Da Silva, M.R.R., Höll, R. y Beurlen, H. 1995. Borborema Pegmatitic Province: geological and geochemical characteristics. *Journal of South American Earth Sciences*, 8: 355-364.
- Demartis, M. 2010. [Emplazamiento y petrogénesis de las pegmatitas y granitoides asociados. Sector central de la Sierra de Comechingones, Córdoba, Argentina. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Río Cuarto. 265 pp. Inédito].
- Demartis, M., Coniglio, J.E., Petrelli, H.A., D'Eramo, F.J., Pinotti, L.P., Agulleiro Insúa, L.A. y Pérez Xavier, R. 2005. Condiciones físico-químicas de los fluidos formadores de pegmatitas graníticas no zonadas del sector sur del Distrito Pegmatítico Comechingones, Córdoba, Argentina. *XVI Congreso Geológico Argentino*, La Plata, Actas 1: 611-618.
- Demartis, M., Coniglio, J.E., Pinotti, L.P., D'Eramo, F.J., Petrelli, H.A., Oddino, H., Silva, D. 2008. Condiciones P-T de cristalización de cuarzos deformados de las pegmatitas del Distrito Comechingones, Córdoba, estimadas a partir de inclusiones fluidas. *IX Congreso de Mineralogía y Metalogenia*, Buenos Aires, Actas: 23-30.
- Demartis, M., Petrelli, H., Coniglio, J., D'Eramo, F., Pinotti, L., Agulleiro Insúa, L.A. y Demartis, P.N. 2009. Proyecto de inversión minera para la explotación y comercialización del yacimiento de cuarzo pegmatítico Otto XIX, Distrito Pegmatítico Comechingones, Córdoba. *IX Congreso Argentino de Geología Económica*, San Fernando del Valle de Catamarca, Actas: 329-337.
- Demartis, M., Coniglio, J.E., Pinotti, L.P., D'Eramo, F.J., Agulleiro Insúa, L.A., Muñoz, A.A. y Petrelli, H.A. 2010a. Modelado de fluidos de las pegmatitas de la porción sur del distrito Comechingones, Córdoba, a partir de nuevos datos de isótopos estables. *X Congreso de Mineralogía y Metalogenia*, Río Cuarto, Actas: 171-178.
- Demartis, M., Pinotti, L., D'Eramo, F., Coniglio, J., Agulleiro Insúa, L. y Petrelli, H. 2010b. Emplazamiento de pegmatitas graníticas del sector sur del Distrito Pegmatítico Comechingones, Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 67: 536-544.
- Demartis, M., Pinotti, L.P., Coniglio, J.E., D'Eramo, F.J., Tubía, J.M., Aragón, E. y Agulleiro Insúa, L.A. 2011a. Ascent and emplacement of pegmatitic melts in a major reverse shear zone (Sierras de Córdoba, Argentina). *Journal of Structural Geology*, 33: 1334-1346.

- Demartis, M., Melgarejo Draper, J.C., Alfonso, P., Coniglio, J.E., Pinotti, L.P. y D'Eramo, F.J. 2011b. Mineralogy of a highly fractionated replacement unit from 'Ángel' Pegmatite, Comechingones Pegmatitic Field, Córdoba, Argentina. *Asociación Geológica Argentina, Serie D, Publicación Especial N°14*: 69-70.
- Fagiano, M. 2007. [*Geología y Petrología del basamento cristalino de las Albabacas, sur de la Sierra de Comechingones, Córdoba*. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Río Cuarto, 380 pp. Inédito].
- Fagiano, M., Pinotti, L., Esparza, A.M. y Martino, R. 2002. La faja de cizalla Guacha Corral, Sierras Pampeanas de Córdoba, Argentina. *XV Congreso Geológico Argentino*, El Calafate, Actas: 259-264.
- Fuertes-Fuente, M. y Martín-Izard, A. 1998. The Forcarei Sur rare-element granitic pegmatite field and associated mineralization, Galicia, Spain. *The Canadian Mineralogist*, 36: 303-325.
- Galliski, M. 1994. La Provincia Pegmatítica Pampeana. I: Tipología y distribución de sus distritos económicos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 49: 99-112.
- Galliski, M. 1999. Distrito pegmatítico Comechingones, Córdoba. En: Zappettini, E.O. (Ed.), Recursos Minerales de la República Argentina. *Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales* 35: 361-364.
- Galliski, M., Perino, E., Gasquez, J., Márquez Zavalía, M.F. y Olsina, R. 1997. Geoquímica de feldespatos potásicos y moscovitas como guía de exploración de pegmatitas graníticas de algunos distritos de la Provincia Pegmatítica Pampeana. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 52: 24-32.
- Goad, B.E. y Černý, P. 1981. Peraluminous pegmatitic granites and their pegmatite aureoles in the Winnipeg River District, Southeastern Manitoba. *The Canadian Mineralogist*, 19: 177-194.
- Hub, C.C. 1994. [*Estudio geológico-económico de pegmatitas del Distrito Comechingones*. Informe Beca CONICOR, provincia de Córdoba, 156 pp. Inédito].
- Hub, C.C. 1995. [*Estudio geológico-económico de pegmatitas del Distrito Comechingones*. Informe Beca CONICOR, provincia de Córdoba, 172 pp. Inédito].
- Martino, R., Kramer, P., Escayola, M., Giambastiani, M. y Arnosio, M. 1995. Transecta de las Sierras Pampeanas de Córdoba a los 32° S. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 50: 60-77.
- Pinotti, L.P., Coniglio, J.E., Esparza, A.M., D'Eramo, F.J. y Llambías, E.J. 2002. Nearly circular plutons emplaced by stoping at shallow crustal levels, Cerro Aspero batholith, Sierras Pampeanas de Córdoba, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 15: 251-265.
- Quéméneur, J. y Lagache, M. 1999. Comparative study of two pegmatitic fields from Mina Gerais, Brazil, using the Rb and Cs contents of micas and feldspars. *Revista Brasileira de Geociências*, 29: 27-32.
- Sardi, F. y Lozano Fernández, R. 2010. Estudio geoquímico preliminar sobre la composición de feldespatos potásicos y moscovitas de pegmatitas de las Sierras de Velasco y Mazán, provincia de La Rioja. *X Congreso de Mineralogía y Metalogénia*, Río Cuarto, Actas: 233-240.
- Whitmeyer, S.J. y Simpson, C. 2003. High strain-rate deformation fabrics characterize a kilometers-thick Paleozoic fault zone in the Eastern Sierras Pampeanas, central Argentina. *Journal of Structural Geology*, 25: 909-922.

Recibido: 25 de octubre de 2011

Aceptado: 14 de diciembre de 2011