

# Magmatismo Calcoalcalino en la Sierra Norte de Córdoba. Su Extensión Temporal

Roberto C. MIRÓ<sup>1</sup>, Joshua SCHWARTZ<sup>2</sup> y Peter GROMET<sup>2</sup>

**Abstract:** *CALCOALKALINE MAGMATIC ACTIVITY IN THE SIERRA NORTE DE CÓRDOBA; IT'S TIME DISTRIBUTION.* Basement of the Sierra Norte in Córdoba, early described by Bodenbender, is mainly composed by gneisses, schists and calcisilicates rocks, considered of Neoproterozoic to Cambrian age, intruded by a granitic batholith of metaluminous calcoalcaline to weakly peraluminous composition, formed by monzogranites and granodiorites. Granitic rocks are considered the remanent of a calc alkaline magmatic arc formed during the Pampean orogeny. Metasedimentary basement at the sierras de Córdoba and Sierra Norte were originally formed in a passive margin of the Río de la Plata craton after the rupture of Rodinia at around 600 My. After sedimentation an accretionary prism was formed against the western margin of the craton in an eastward subduction process. Early magmatic activity at Sierra Norte is considered a precolisional event after the initial stage of the subduction process developed in the western margin of Gondwana. Geochronological studies of some granitic rocks of the calcoalcaline arc, made by U-Pb analysis, clearly shows that the calcoalcaline magmatic activity lasted almost 30 My, between 555 to 525 My, preceding the development of a western parallel peraluminous arc and contemporaneous metamorphism in the Sierras de Córdoba, produced between 525 to 505 My.

**Resumen:** *MAGMATISMO CALCOALCALINO EN LA SIERRA NORTE DE CÓRDOBA; SU EXTENSIÓN TEMPORAL.* El basamento metamórfico de la Sierra Norte de Córdoba, descrito inicialmente por Bodenbender, está formado por paragneises, esquistos y calcosilicatos de edad Neoproterozoica a Cámbrica, intruidos por un batolito de composición calcoalcalina metaluminosa a debilmente peraluminosa en el que predominan monzogranitos y granodioritas. Las rocas graníticas constituyen el remanente de un arco magmático asociado a la orogenia Pampeana. Las rocas metasedimentarias de las Sierras de Córdoba y de la Sierra Norte son parte de una secuencia de margen pasivo desarrollada en forma marginal al borde occidental del cratón del Río de la Plata, que se formó después de la fracturación de Rodinia, a partir de los 600 Ma. Posteriormente esta secuencia sedimentaria desarrolló un prisma de acreción durante un período de subducción dirigido hacia el este. La primera fase de la actividad magmática de la Sierra Norte de Córdoba se vincula a la etapa de subducción pre-colisional del ciclo orogénico que se desarrolló durante la convergencia del margen occidental de Gondwana. Los estudios geocronológicos efectuados por el método U/Pb sobre varias unidades magmáticas de la Sierra Norte muestran que el magmatismo calcoalcalino ocurrió durante un período de 30 Ma, entre los 555 y los 525 Ma, precediendo al magmatismo peraluminoso y al metamorfismo de las Sierras de Córdoba, el cual se produjo entre los 525 y 505 Ma.

**Key words:** Sierras Pampeanas Orientales. Cámbrico. Pampean Orogeny

**Palabras clave:** Sierras Pampeanas Orientales. Cámbrico. Orogénico Pampeano

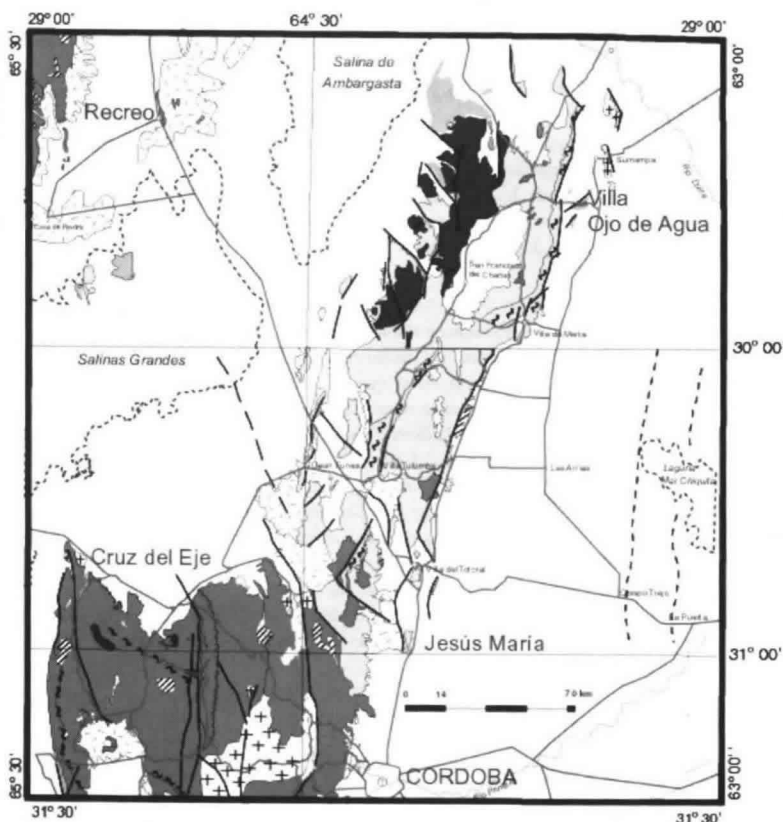
## Introducción

Bodenbender (1905) estableció una secuencia para la serie magmática de las sierras de Córdoba y en particular para la Sierra Norte que incluía dioritas, granitos s.l. y pórfidos cuarcíferos. De acuerdo con su descripción las rocas ígneas intruyeron a un basamento "arcaico" formado por gneis, calizas y pizarras. El magmatismo acompañó a una fase de plegamiento y fracturación, que fue anterior a la sedimentación permo-carbónica.

<sup>1</sup> SEGEMAR, Córdoba. Av. Lugones 161 (Vialidad). 5000 – Córdoba. Argentina. E-mail: rmiro@uolsinectis.com.ar

<sup>2</sup> Universidad de Brown, USA.

Tal como se comprobaba en estudios subsiguientes el basamento metamórfico en la Sierra Norte de Córdoba y su continuación en las sierras de Ambargasta y Sumampa, en la provincia de Santiago del Estero, esta formado por paragneises, esquistos y calcosilicatos (Quartino, 1967) de edad Neoproterozoica a Cámbrica (Linares y Gonzalez, 1990), intruidos por granitoides de dimensiones batolíticas de composición calco-alcalino metaluminosa a debilmente peraluminosa (Lira *et al.*, 1997) (figura 1). Las rocas graníticas constituyen el remanente de un arco magmático asociado a la orogenia Pampeana (Aceñolaza y Miller, 1982; Northrup *et al.*, 1998). Este arco magmático ha intruido una secuencia metamórfica formada por esquistos cuarzo-biotíticos, gneises tonalíticos, anfíbolitas y migmatitas, agrupada como Formación Pozo del Macho (Castellote, 1985b), calizas, y remanentes aislados de filitas cuarcíferas, pizarras y conglomerados submetamórficos, que pertenecen a la Formación Simbol Huasi (Lucero, 1969).



#### REFERENCIAS

	CUATERNARIO Depósitos eólicos, fluviales		Fajas miloníticas		Complejos metamórficos
	CRETÁCICO - TERCARIO Sedimentario - Volcánico		Granitoides ordovidicos s.l.		Rufas principales
	CARBONICO-PERMICO Sedimentario		Granitoides cámbricos Tipo 5		Ríos principales
	Granitoides devónicos s.l.		Granitoides cámbricos Tipo 1		Fracturas terciarias

Fig. 1. Mapa regional de las sierras de Córdoba, Norte, Sumampa y Ambargasta.

## Sedimentación precolisional y metamorfismo

Las secuencias metasedimentarias reconocidas en la Sierra Norte de Córdoba y su continuación en las sierras de Ambargasta y Sumampa (Santiago del Estero) indican que en el borde occidental de Gondwana se desarrolló un margen pasivo con posterioridad a la fragmentación del supercontinente de Rodinia (figura 2). No existe un consenso acerca de la edad de la apertura de la cuenca y desarrollo de una fosa sedimentaria abierta en este sector de Sudamérica, el "mar puncoviscánico" (Durand, 1996), aunque puede decirse que en general abarcó la mayor parte del período neoproterozoico (620 a 540 Ma). En las Sierras Pampeanas Orientales (Caminos, 1979) la unidad más representativa de la sedimentación proterozoica es la Formación Puncoviscana, descrita en una extensa región de Argentina tanto en sus términos sedimentarios y metamórficos de bajo grado, a lo largo de las provincias de Jujuy, Salta, Tucumán, Catamarca y Santiago del Estero, abarcando una región entre los 26° y 29° de latitud sur (Durand, 1996). Hacia el sur los sedimentos estarían representados por las asociaciones metamórficas de grado medio a alto aflorantes en las sierras de Córdoba y San Luis (Sims et al., 1998). En conjunto los protolitos sedimentarios de esta sección corresponderían a una secuencia clásica de tipo flysch con frecuentes intercalaciones carbonáticas.

Modelo de distribución de la placa tectónica de Gondwana a los ~ 550 Ma

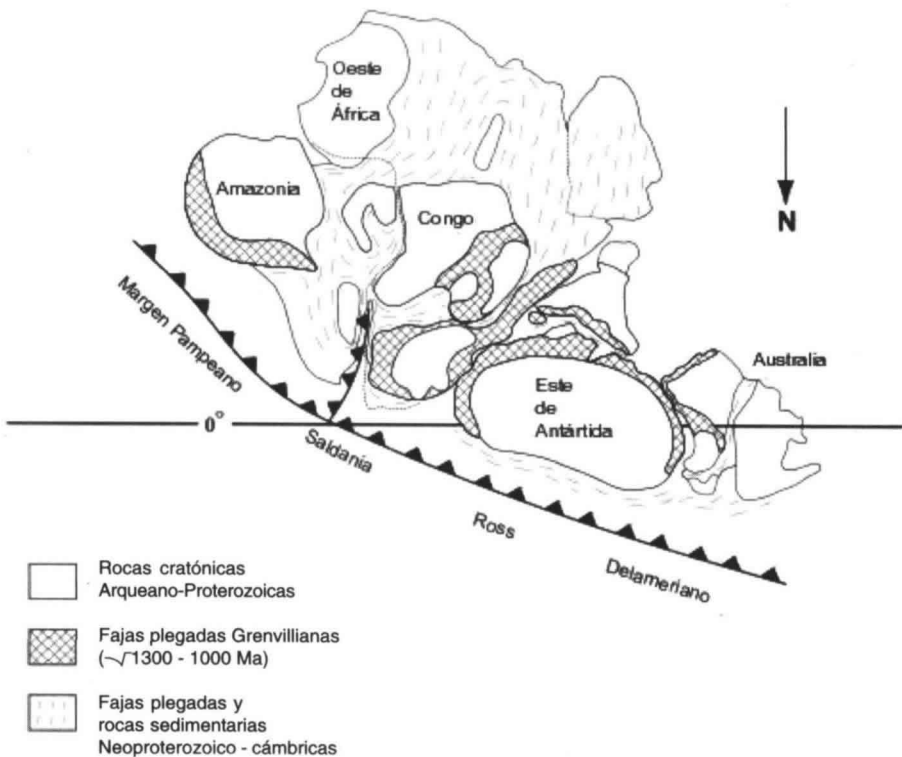


Fig. 2. Modelo de distribución de la placa de Gondwana a los 550Ma aproximadamente.

El arco magmático calcoalcalino de las sierras Norte, Sumampa y Ambargasta, se desarrolló en el borde occidental del cratón del Río de la Plata (Dalla Salda, 1987; Rapela *et al.*, 1998). La porción del arco aflorante en la Sierra Norte y su continuación septentrional no intruye en forma visible rocas del ambiente cratónico. Los remanentes más cercanos de este último se encuentran aflorando 700 km hacia el este, en el río de la Plata (isla Martín García), separados por la llanura pampeana. En esta región la caja de los granitoides está constituida exclusivamente por unidades metamórficas de grado medio a bajo de la Formación Simbol Huasi (Miró, 2001). Cabe suponer que el entorno metamórfico de las rocas magmáticas representa al evento tectónico y metamórfico que precedió, al menos parcialmente, a la formación del arco y por tal motivo resulta de interés conocer la historia sedimentaria y metamórfica del margen pasivo. Los remanentes sedimentarios y metasedimentarios de este sector de las Sierras Pampeanas han sido estudiados desde el punto de vista geocronológico bajo dos aspectos. Por un lado se han efectuado dataciones U-Pb en circones sedimentarios incluidos en rocas metamórficas de bajo grado (Lork *et al.*, 1990; Sims *et al.*, 1998; Schwartz y Gromet, 2004). Complementariamente se han efectuado una gran cantidad de dataciones del evento metamórfico (Rapela *et al.*, 1998).

Un estudio de proveniencia efectuado sobre circones detríticos en gneises de la región septentrional de las sierras de Córdoba (Sims *et al.*, 1998) indicó que las unidades metasedimentarias correspondían a un terreno autóctono gondwánico que había recibido aportes de tres áreas principales, situadas al este-noreste de Sudamérica, de rocas con edades neoproterozoicas (600-700 Ma), grenvillianas (950-1050 Ma) y paleoproterozoicas (1.900 Ma). Estos datos fueron corroborados más recientemente por Schwartz y Gromet (2004). En coincidencia con este origen un estudio de las orientaciones de las estructuras de corriente sedimentarias para una sección más al norte de la Formación Puncoviscana muestran una dirección casi unipolar, con una proveniencia desde el este-sudeste de la cuenca, que correspondería al sector pacífico del área cratónica (Jezek, 1990). En esta sección los análisis de circones detríticos arrojaron edades de deposición máxima entre 530 y 560 Ma (Lork y Balhburg, 1993). Una datación reciente (Rb/Sr) en una ignimbrita riolítica contenida en una secuencia sedimentaria atribuida a la Formación La Lidia-Simbol Huasi (Miró, 2001), equivalente a la Formación Puncoviscana, al oeste de la Sierra Norte, mostró un edad en la intersección superior de  $584 \pm 22$  Ma y en la intersección inferior de  $329 \pm 50$  Ma (Llambías *et al.*, 2003). Se puede concluir que la evidencia registrada hasta el presente acerca del inicio de la sedimentación en la cuenca de Puncoviscana sería de 600 Ma (Jezek *et al.*, 1985).

La etapa siguiente a la sedimentación en el margen pasivo corresponde al desarrollo de un margen activo que derivó en la formación de un prisma de acreción que se formó en el borde occidental de Gondwana, como parte de un evento colisional coincidente con un proceso de subducción hacia el este. Este evento fue acompañado por un metamorfismo polifásico cuyos registros más completos han sido reconocidos en la sección central de las sierras de Córdoba (Baldo *et al.*, 1996a).

Las edades más antiguas del metamorfismo de los sedimentos de la Formación Puncoviscana de bajo grado en la región más septentrional de las Sierras Pampeanas, oscilan entre  $538 \pm 23$  Ma a  $520 \pm 14$  Ma (Cordani *et al.*, 1990, Rb/Sr en roca total) y entre 535 y 540 Ma (Adams *et al.*, 1990; método K-Ar en roca total). Más hacia el sur, Bachmann *et al.* (1986) efectuaron estudios geocronológicos (Rb/Sr, roca total) en gneises bandeados de Ancasti, obteniendo una edad de  $548 \pm 27$  Ma. En el sector central de las sierras de Córdoba las edades metamórficas han dado una edad media para el metamorfismo principal (M2) de  $522 \pm 8$  Ma (Rapela *et al.*, 1998; método U-Pb, monacita y circones). Otro grupo de edades, obtenidas por el método Th-Pb, arrojaron una edad media de  $534 \pm 7$  Ma (Rapela *et al.*, 1998).

Castellote (1985a) efectuó dataciones K-Ar de las unidades metamórficas en la región de las sierras de Ambargasta y Sumampa que aproximarían la edad del metamorfismo entre 530 y 598 Ma.

El Cuadro 1 resume las edades más significativas asignadas al metamorfismo de la Formación Puncoviscana. Estas edades indicarían que las unidades metamórficas del extremo oriental de las Sierras Pampeanas representan al primer evento metamórfico, M1 de la región central (Baldo et al., 1996b), desarrollado durante la etapa inicial de la subducción y transformación del margen pasivo. En este ambiente las unidades metamórficas poseen una foliación penetrativa con una orientación NO-SE, con inclinación entre 30° y 50° al este, que es acompañada por pliegues isoclinales y ocasionalmente por clivaje de crenulación. En la región central las unidades metamórficas han desarrollado una foliación S2 de orientación N-S a NNO-SSE asociada a la formación de grandes pliegues recumbentes con vergencia al oeste.

Cabe señalar que el metamorfismo principal, M2, tal como se lo ha reconocido en la región central de las sierras de Córdoba (Baldo et al., 1996b), habría ocurrido con posterioridad al magmatismo calco-alcalino del arco oriental (sierras Norte, Ambargasta y Sumampa).

Trabajo	Método	Unidad	Litología	Edad en Ma.
Castellote (1985b)	K-Ar	Fm. Pozo del Macho (La Totorá)	Esquistos cuarzo biotítico	530 ± 20
Castellote (1985b)	K-Ar	Fm. Pozo del Macho (San Pedro Viejo)	Esquistos cuarzo biotítico	598 ± 20
Castellote (1985b)	K-Ar	Fm. Pozo del Macho (San Miguel) M1 ?	gneis	568 ± 20
Rapela et al., 1998	U-Pb monacita y zircón	M2	migmatita	522 ± 8
Cordani et al., 1990	Rb-Sr en roca total	M2 ?	Esquistos de bajo grado	538 ± 23

Cuadro 1. Edades metamórficas en la Formación Puncoviscana

## Desarrollo de los arcos magmáticos calcoalcalino y peraluminoso

La Sierra Norte de Córdoba junto con las sierras de Macha y Sauce Punco hacia el sur y de Ambargasta y Sumampa hacia el norte, en la provincia de Santiago del Estero, constituyen el área de afloramientos del arco magmático oriental calcoalcalino (figura 1). La Sierra Norte se compone esencialmente de un batolito formado por granitoides metaluminosos y, en menor proporción, débilmente peraluminosos. De acuerdo con la descripción geoquímica la serie magmática se originó en un proceso de cristalización fraccionada de magmas calcoalcalinos que variaron de metaluminosos a débilmente peraluminosos (Lira et al., 1997). En la sierra Norte de Córdoba y su extensión septentrional en Santiago del Estero, la secuencia intrusiva comprende como componente principal un monzogranito compuesto por cuarzo, microclino con bordes albiticos (textura rapakivi), plagioclasa, biotita y como accesorios, minerales opacos, allanita, titanita, apatita y zircón. Ocasionalmente se observa hornblenda. El grano es mediano a grueso y frecuentemente porfiroide. La unidad ha sido descrita como Monzogranito porfiroide Ojo de Agua (Miró, 2001).

Los cuerpos granodioríticos, agrupados bajo la denominación de Granodiorita Tres Lomitas (Bonalmi, 1988), poseen igualmente una extensión importante, alcanzando mayor desarrollo hacia el sector occidental del batolito. Son de textura de grano fino a mediano y se componen de andesina, cuarzo, biotita, hornblenda y feldespatos potásicos. Como accesorios se observa apatita, magnetita,

zircón, titanita, allanita y opacos. Formando parte de una fase posterior en el proceso de evolución magmática se reconocen dentro del área batolítica intrusiones de menor extensión de dacitas, monzogranitos miarolíticos y riolitas, y finalmente se encuentra una última fase, formada durante una etapa póstuma de la orogenia, abundantes cuerpos aplíticos, filones porfíroides y pegmatitas que atraviesan a las unidades anteriores. Es destacable que esta secuencia de los cuerpos ígneos está comprobada por el relevamiento regional (Lira *et al.*, 1997; Miró, 2001) poniendo en evidencia la contradicción de algunos datos geocronológicos. Considerando la relación geoquímica evolutiva del conjunto ígneo que forma este arco magmático todas las unidades mencionadas han sido agrupadas dentro del Complejo Ígneo Ojo de Agua-Ambargasta (Miró, 2001). La asociación descripta guarda además una relación temporal con un evento colisional que corresponde con la evolución del arco magmático y que forma parte del ciclo orogénico Pampeano, el cual se extendió hasta el Cámbrico Superior. La relación del magmatismo con el proceso orogénico está confirmada por la existencia de fajas de cizalla que atraviesan el batolito en sentido NE-SO, con cinemática dextral predominante (Miró *et al.*, 1999). Las temperaturas de recristalización indicarían que las cizallas ocurrieron durante las etapas finales de emplazamiento magmático o sea en el Cámbrico medio a superior.

Los estudios geoquímicos muestran un desarrollo del arco magmático según una secuencia de cristalización fraccionada (Lira *et al.*, 1997) que se correlaciona con la evolución del proceso de subducción. Las características geoquímicas indicarían que la fase de mayor actividad magmática correspondió a un estado de subducción precolisional del ciclo orogénico, al inicio del proceso de convergencia tectónica (Lira *et al.*, 1997). En el sector al oeste de la Sierra Norte o sea la región central de las sierras de Córdoba, los granitos metaluminosos identificados como granitos G1a por Rapela *et al.* (1998) se atribuyen a una etapa sin y post colisional.

El arco magmático calcoalcalino corresponde a la fase inicial del ciclo orogénico Pampeano que se desarrolló en el borde occidental del cratón del Río de la Plata. La datación de los granitoides del arco oriental resulta por consiguiente del mayor interés para la construcción de los modelos de evolución tectónica de la orogenia Pampeana. Las primeras determinaciones de las unidades magmáticas se efectuaron sobre roca total o biotita por el método K-Ar y arrojaron edades que oscilaban entre 400 y 600 Ma (Castellote, 1982; Castellote, 1985a; González *et al.*, 1985; Massabie *et al.*, 2002). Estudios más recientes, realizados por el método U-Pb en circones arrojaron resultados parcialmente coincidentes con los primeros datos. Una determinación U-Pb en circón (método SHRIMP) en el monzogranito Ojo de Agua, arrojó un valor de  $515 \pm 4$  Ma (Stuart-Smith *et al.*, 1999), indicando la gran dificultad para la realización de estudios isotópicos en rocas que contenían abundante material heredado. El Cuadro 2 muestra las edades obtenidas por diferentes métodos en las unidades ígneas.

Del mismo modo Söllner *et al.* (2000) determinaron la edad de una riocacita de la sierra de Ambargasta en  $557 \pm 4$  Ma (método U/Pb) con datos fuertemente discordantes. Edades considerablemente más antiguas, entre 600 y 630 Ma (método Rb-Sr en roca total), fueron determinadas por Millone *et al.* (2003) en unidades dacíticas, riolíticas, granodioríticas y monzograníticas de la sierra de Ambargasta, aumentando la incertidumbre sobre la edad de formación del arco.

Inmediatamente al oeste del arco magmático alcalino de la sierra Norte se desarrolló un extenso arco magmático peraluminoso, formado mayormente por monzogranitos cordieríticos sillimaníticos (figura 1). Los granitos fueron agrupados por Rapela *et al.* (1998) como pertenecientes al grupo G1b (granitos fuertemente peraluminosos), derivados de procesos de anatexis que se originaron por descompresión isotérmica y vinculados a una amplia migmatización en el ambiente metamórfico de grado medio a alto. Los cuerpos de El Pílon y de Juan XXIII, asociados a macizos migmáticos de la región central de Córdoba, se consideran típicos de este magmatismo. Numerosas dataciones efectuadas con grados de confianza elevados en los granitoides G1b arrojaron edades entre 525 y 519 Ma (Rapela *et al.*, 1998).

Trabajo	Método	Unidad	Litología	Edad en Ma.
Castellote (1982)	K-Ar en biotita	Granito Ambargasta		520 ± 15
Gonzalez et al (1985)	K-Ar	Granito Ambargasta	Granito	484 ± 20 597 ± 15
Rapela et al 1991	Rb/Sr RT		Granito porfírico Oncán	494 ± 11 (UI) 329 ± 50 (LI)
Rapela et al (1998)	U/Pb, circón		Granodioita con Horn y Biot	@ 530
Stuart-Smith et al (1999)	U/Pb Shrimp, circón	Ojo de Agua	Monzogranito	515 ± 4
Sollner et al (2000)	U/Pb circon	Ambargasta	Riodacita	557 ± 4 (UI)
Koukharsky et al (1999)	K-Ar	Contacto granito Ambargasta	Hornfels	500 ± 14
Llambias et al (2003)	U/Pb circón	La Lidia-Símbol Huasi (Puncoviciana)	Ignimbrita riolitica	584 ± 22 (UI)
Millone et al (2003)	Rb/Sr, roca total		Granodiorita-monzogranito	627 ± 27
Millone et al (2003)	Rb/Sr, roca total		dacita-riolita Cerro de los Burros	607 ± 7 (isocrona de 2 puntos)
Millone et al (2003)	Rb/Sr, roca total		Monzogranito Puesto de los Caminos	523 ± 4
Leal et al (2003)	U/Pb en circón	Dacita Los Burros		512 ± 3,5 (media)

UI, intersección superior; LI, intersección inferior

**Cuadro 2.** Edades de diferentes tipos litológicos del arco magmático calcoalcalino oriental

## Nuevas dataciones U/Pb de las rocas calcoalcalinas

En un trabajo reciente fueron realizadas nuevas dataciones U-Pb en diferentes unidades aflorantes en la Sierra Norte y su continuación en las sierras de Sumampa y Ambargasta (Schwartz *et al.*, 2003). Sobre un total de 12 muestras analizadas, 9 fueron seleccionadas por su representatividad y grado de certidumbre (ver Cuadro 3). Los datos obtenidos figuran en la tabla adjunta.

Complejo Ascochinga Rgr 3	Circón	Monzogranito	553 ± 7 UI
Dacita los Burros Amb 1	Circón	Dacita porfirica	535 ± 8 UI
Granodiorita Tres Lomitas Oda 7	Circón	Granodiorita deformada	540
Monzogranito Ojo de Agua - Amb 6	Circón	Monzogranito miarolítico	541 ± 12 UI
Monzogranito Ojo de Agua - Amb 5	Circón	Monzogranito	554 ± 7
Monzogranito Ojo de Agua - Oda 10	Circón	Monzogranito	542 ± 11 UI
Monzogranito Ojo de Agua - Oda 9	Circón	Monzogranito	532 ± 8

**Cuadro 3.** Edades U-Pb en circones. Arco magmático calcoalcalino (Schwartz *et al.*, 2003)

Los análisis U-Pb se hicieron tanto por el método de disolución en cristal único como por evaporación de poblaciones de granos.

Complementariamente se realizaron determinaciones de edades Sr-Nd para reconocer el origen de los componentes corticales. Las composiciones isotópicas iniciales de Sr87/Sr86 varían entre 0,707 y 0,712 (Schwartz *et al.*, 2003) evidenciando que existe un aporte cortical importante en los magmas originales calco-alcalinos. Las edades modelo de Nd143/Nd144 varían entre 1,35 y 1,58 Ga (Schwartz *et al.*, 2003) indicando igualmente la posibilidad que el arco magmático se haya formado en parte con el aporte de una corteza antigua subyacente.

Se puede interpretar con los datos aportados que el ciclo orogénico Pampeano se desarrolló entre el Neoproterozoico y el Cámbrico Medio generando dos arcos magmáticos paralelos, el arco magmático oriental calcoalcalino, que finalizó en una asociación débilmente peraluminosa (Lira *et al.*, 1997) y el arco magmático occidental, conteniendo granitoides peraluminosos asociados a gneises pelíticos y psamíticos (Rapela *et al.*, 1998). Los estudios geocronológicos efectuados hasta el presente muestran que además de la relación espacial entre ambos arcos existe una secuencia temporal en la evolución de los mismos, siendo el más antiguo el que correspondió al sector oriental. Las edades absolutas indicarían que el magmatismo calcoalcalino se desarrolló por un período de aproximadamente 30 Ma, entre 555 y 525 Ma, habiendo precedido al magmatismo peraluminoso que se extendió hacia el oeste del arco anterior, aflorante en casi toda la extensión de las sierras de Córdoba, y que habría ocurrido entre los 525 y 515 Ma (figura 3).

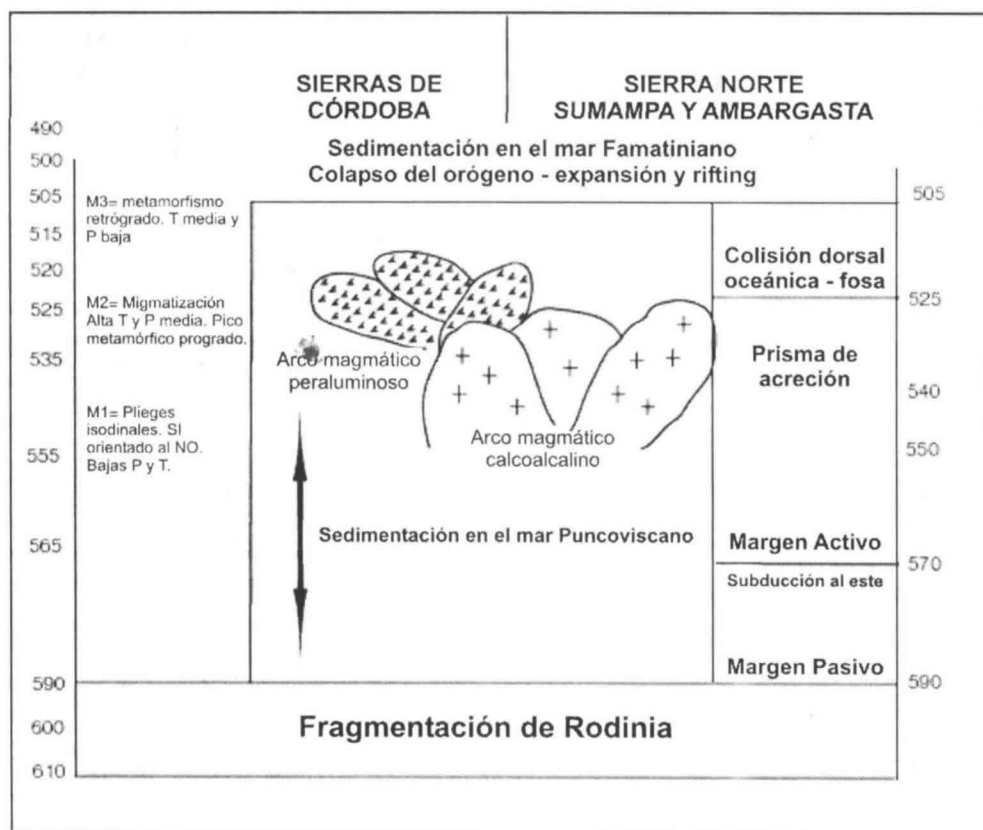


Fig. 3. Cuadro de correlación de eventos en las Sierras Pampeanas Orientales.

## Implicancias en los modelos tectónicos

Varios modelos tectónicos han sido propuestos para representar la evolución del sector sudamericano del borde oriental de Gondwana a partir del fraccionamiento del supercontinente Rodinia, ocurrido en el Neoproterozoico (Unrug, 1992). Sin embargo la relación temporal entre los arcos magmáticos desarrollados en el sector oriental de las Sierras Pampeanas Orientales condiciona la interpretación de los modelos tectónicos que explicarían la evolución del margen occidental de esta



porción del Gondwana. El modelo comunmente aceptado para explicar el desarrollo del magmatismo calcoalcalino y peraluminoso posterior sería de una colisión continental del tipo continente-continente. En este caso ambos arcos magmáticos se habrían originado por subducción de corteza oceánica en el borde occidental de Gondwana y la posterior colisión de un bloque continental alóctono o para-alóctono (Kraemer *et al.*, 1995; Rapela *et al.*, 1998; Ramos *et al.* 2002). Ambos arcos tendrían un desarrollo próximo pero debería existir un intervalo de tiempo de varios Ma en su origen para permitir el calentamiento con posterioridad al engrosamiento cortical (p.ej. Himalayas).

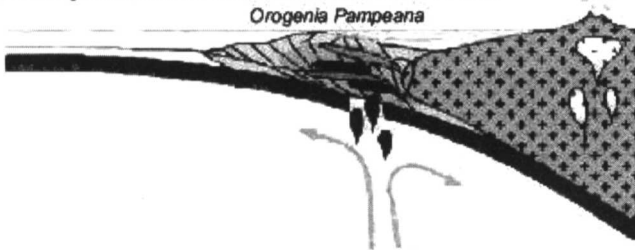
Las características metamórficas y estructurales, junto con las nuevas edades mencionadas, muestran que el ciclo orogénico Pampeño se habría iniciado a los 555 Ma. con un proceso de subducción hacia el este, y que tuvo su climax con la probable colisión de una dorsal oceánica con la fosa del mar puncoviscano, que se habría producido a los 525 Ma. En este modelo de colisión (*ridge-trench collision*) el arco magmático peraluminoso, desarrollado en las sierras de Córdoba a partir de los 525 Ma y que intruye rocas metamórficas de alta temperatura y presiones bajas a medias, correspondería a la continuación del proceso de subducción por debajo del prisma de acreción pampeano (Gromet y Simpson, 2000; Schwartz *et al.*, 2005) (figura 4).

Fase del prisma de acreción  $\sim 555$  Ma.



Fase de subducción y colisión dorsal oceánica - fosa  $\sim 520$  Ma.

Orogenia Pampeana



Granitos S



Granitos I



Intrusiones básicas



Basamento metamórfico

Fig. 4. Modelo de colisión arco-continente.

Como evidencias complementarias de la existencia de un proceso de subducción que finalizó con una colisión del tipo dorsal oceánica-fosa podemos mencionar, a) la frecuente presencia de pliegues chevron de baja temperatura desarrollados en un evento deformacional (etapa del prisma de acreción) con anterioridad al pico metamórfico y a la anatexis, ocurrida entre 535-515 Ma; b) la evidencia de que el pico metamórfico progrado, ocurrido aproximadamente a los 535 Ma, es anterior a la deformación más intensa y esta caracterizado por presiones bajas a medias (Baldo *et al.*, 1996a) en contraposición a las presiones y temperaturas altas que pueden esperarse en una corteza engrosada producida por una colisión continente-continente c) la contemporaneidad entre el pico metamórfico y el magmatismo

peraluminoso (525 a 515 Ma), seguidos por un proceso de enfriamiento rápido (Simpson *et al.*, 2002). En este modelo los magmas peraluminosos se habrían formado en la base del prisma durante el proceso final, cercano a la extinción de la placa subductante (figura 4) e inmediatamente anterior a la modificación de la interacción de las placas (nueva etapa de expansión).

Es notable que a lo largo del borde paleo-pacífico de Gondwana se conocen similares relaciones temporales entre colisiones de arco y un magmatismo peraluminoso como en los orógenos de Ross (en Antártida), Delamerian (en Australia) y Saldania (en África), ocurridas durante el período Neoproterozoico-Cámbrico Medio (Flottman *et al.*, 1993).

## Conclusiones

- Se pueden reconocer dos arcos magmáticos en el borde oriental de las Sierras Pampeanas: Un arco oriental calcoalcalino de afinidad con granitos de tipo I, intruido en un basamento de medio a bajo grado, y un arco occidental plutónico peraluminoso, intruido este último en un basamento de grado medio a alto.
- Nuevas determinaciones geocronológicas U/Pb realizadas en circones en las unidades monzograníticas, granodioríticas y dacíticas muestran que el arco magmático calco-alcalino oriental estuvo activo por un período de 35 Ma, entre 555 y 520 Ma. Las edades de las rocas calcoalcalinas de las sierras de Córdoba son equivalentes a las de las rocas similares de la Sierra Norte y es probable que correspondan a un mismo evento. Las edades U/Pb indicarían que el arco oriental se desarrolló con anterioridad al arco peraluminoso occidental, el cual muestra edades que oscilan entre 530 y 515 Ma.
- De acuerdo con las edades absolutas el arco magmático oriental finalizó abruptamente poco después del inicio de la formación del arco magmático occidental. Esta observación no sería compatible con la idea de que el ciclo Pampeano culminó con una colisión del tipo continente-continente. Este modelo requeriría un lapso de tiempo importante entre el desarrollo de ambos arcos para permitir el calentamiento cortical. Por el contrario sería más consistente con una colisión del tipo dorsal oceánica-fosa, que se inició como un proceso de subducción de corteza oceánica en dirección al cratón del Río de la Plata, aproximadamente a los 555 Ma y finalizó aproximadamente a los 525 Ma, con una colisión de la dorsal, ocurrida inmediatamente después del evento metamórfico de mayor intensidad.

## Referencias

- Aceñolaza, F. y Miller, H., 1982. Early Palaeozoic orogeny in southern America. *Precambrian Research*, 17: 133-146.
- Adams, C., Miller, H. & Toselli, A., 1990. Nuevas edades de metamorfismo por el método K-Ar de la Formación Puncoviscana y equivalentes, NO de Argentina. En Aceñolaza, F., Miller, H. & Toselli, A. (Eds.), *El Cielo Pampeano en el Noroeste Argentino. Universidad Nacional de Tucumán, Serie Correlación Geológica*, 4:209-219.
- Bachmann, G., Grauert, B. y Miller, H., 1986. Isotopic dating of polymetamorphic metasediments from North-west Argentina. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*. Heft 9/10:1257-1268. Stuttgart.
- Baldo, E., Casquet, C. y Galindo, C., 1996a. El metamorfismo de la Sierra Chica de Córdoba (Sierras Pampeanas), Argentina. *Geogaceta*, 19: 48-51.
- Baldo, E., Demange, M. y Martino, R., 1996b. Evolution of the Sierras de Córdoba, Argentina. *Tectonophysics*, 267: 121-142.
- Bodenbender, G., 1905. La Sierra de Córdoba. Constitución geológica y productos minerales de aplicación. *Anales del Ministerio de Agricultura, sección Geología, Mineralogía y Minería*. Buenos Aires. Tomo I, n° 2.
- Bonalumi, A., 1988. Características petrológicas y geoquímicas de los granitoides asociados a la mineralización de Mn en el norte de la provincia de Córdoba y sur de Santiago del Estero. *5° Congreso Geológico Chileno*, Actas 2:47-61.
- Caminos, R., 1979. Sierras Pampeanas Noroccidentales. Salta, Tucumán, Catamarca, La Rioja y San Juan. En J.M.

- Turner (Ed.), *Segundo Simposio de Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias de Córdoba*, 1,225-291. Córdoba.
- Castellote, P.R., 1982. La Formación La Clemira y edad de su metamorfismo, *Acta Geológica Lilloana*, 16, 71-76.
- Castellote, P.R., 1985a. Algunas Observaciones Geológicas en las Sierras de Ambargasta y Sumampa, *Acta Geológica Lilloana*, 16, 259-269.
- Castellote, P.R., 1985b. La Formación Pozo del Macho, integrante del basamento metamórfico de la sierra de Ambargasta, provincia de Santiago del Estero. *Acta Geológica Lilloana*, 16 (2): 275-280.
- Cordani, U., Omarini, R., Vancini, K.R. y Petronilho, L., 1990. Geocronología Rb/Sr y K/Ar del complejo granítico Santa Rosa de Tastil y de la Formación Puncovicana, Salta, Argentina. *XI Congreso Geológico Argentino*, San Juan, Actas II: 239-242.
- Dalla Salda, L.H., 1987. Basement tectonics of the Southern Pampean Ranges, Argentina, *Tectonics*, 6, (3), 249-260.
- Durand, F., 1996. La transición Precámbrico-Cámbrico en el sur de Sudamérica. En: Baldi, B. y Aceñolaza, F. (Eds.), *Early Paleozoic evolution in NW Gondwana*. Universidad Nacional de Tucumán, Serie Correlación Geológica 12, 195-205.
- Flottnann, T., Gibson, G., y Kleinschmidt, G., 1993. Structural Continuity of the Ross and Delamerian Orogens of Antarctica and Australia Along the Margin of the Paleo-Pacific, *Geology*, 21, 319-322, 1993.
- González, R.R., Cabrera, M., Bortolotti, P., Castellote, P., Cuenya, M., Omil, D., Moyano, D. & Ojeda, J., 1985. La actividad eruptiva en Sierra Pampeanas. Esquemización geográfica y temporal, *Acta Geológica Lilloana*, 16, 289-318.
- Gromet, L.P. y Simpson, C., 2000. *Cambrian orogeny in the Sierras Pampeanas, Argentina: ridge subduction or continental collision?*, en Geological Society of America, Abstracts with Programs, vol. 32, pp. A-505, Boston.
- Jezek, P. 1990. *Análisis sedimentológico de la Formación Puncovicana*. En Aceñolaza, F., Miller, H. y Toselli, A. (Eds.), El Ciclo Pampeano en el Noroeste Argentino. Universidad Nacional de Tucumán, Serie Correlación Geológica, 4: 9-36.
- Jezek, P., Willner, A., Aceñolaza, F. y Miller, H. 1985. *The Puncovicana through; a large basin of Late Precambrian to Early Cambrian age on the Pacific edge of the Brazilian shield*. Geologische Rundschau, 74/3: 573-584.
- Koukharsky, M., Munizaga, F., Leal, P., Correa, M. & Brodtkorb, M.K. 1999. *New K/Ar ages in the Ambargasta and Norte de Córdoba Ranges, Argentina*. II South American Symposium on Isotope Geology, Carlos Paz, Córdoba. Actas 2: 76-77.
- Leal, P., Hartmann, L., Santos, J., Miró, R. y Ramos, V. 2003. Volcanismo postorogénico en el extremo norte de las Sierras Pampeanas Orientales: Nuevos datos geocronológicos y sus implicancias tectónicas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 58 (4): 593-607.
- Kraemer, P.E., Escayola, M. y Martino, R., 1995. Hipótesis sobre la evolución tectónica neoproterozoica de las Sierras Pampeanas de Córdoba (30°40'-32°40'), *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 50, 47-59.
- Linares, E. y Gonzalez, R.R., 1990. Catalogo de edades radiométricas de la República Argentina, 1957-1987. *Publicación especial de la Asociación Geológica Argentina*, 627 p, Buenos Aires.
- Lira, R., H.A. Millone, A.M. Kirschbaum & R.S. Moreno, 1997. *Calc-alkaline arc granitoid activity in the Sierra Norte-Ambargasta ranges, Central Argentina*, Journal of South American Earth Sciences, 10, 157-177.
- Llambías, E.J., Gregori, D., Basei, M., Varela, R. y Prozzi, C., 2003. Ignimbritas riolíticas neoproterozoicas en la Sierra Norte de Córdoba: evidencia de un arco magmático temprano en el ciclo Pampeano, *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 58, 572-582.
- Lork, A., Miller, H., Kramm, U. y Grauert, B., 1990. Sistemática U/Pb de circones detriticos de la Fm. Puncovicana y su significado para la edad máxima de sedimentación en la sierra de Cachi (prov. De Salta, Argentina). En Aceñolaza, F., Miller, H. & Toselli, A. (eds.), El Ciclo Pampeano en el Noroeste Argentino. Universidad Nacional de Tucumán, Serie Correlación Geológica, 4: 199-208.
- Lork, A. y Bahlburg, H., 1993. Precise U-Pb ages of monazites from the Faja Eruptiva de la Puna Oriental, NW Argentina. *XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos*, Mendoza, Actas IV: 1-6.
- Lucero, H. N., 1969. Descripción geológica de las hojas 16h "Pozo Grande" y 17h "Chuña Huasi" (Santiago del Estero y Córdoba). *Carta geológica-económica de la República Argentina*. Dirección Nacional de Geología y Minería. 39 p.
- Massabie, A., Mutti, D., y Nestiero, O., 2002. Edad, afinidades geoquímicas y tectónicas del pórfido riolítico de La Lidia, Sierra Norte de Córdoba, *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 57, 80-84.
- Millone, H.A., Tassinari, C.C., Lira, R. y Poklepovic, M.F., 2003. New ages and strontium-neodymium isotope geochemistry of granitoids of the Sierra Norte-Ambargasta batholith, central Argentina, IV South American Symposium on Isotope Geology, 617-620.
- Miró, R., Gaido, M.F. y Candiani, J.C., 1999. *Fajas de Deformación del batolito Sierra Norte de Córdoba y Santiago del Estero*. XIV Congreso Geológico Argentino, Salta: 152-155.
- Miró, R.C., 2001. *Hoja geológica Villa Ojo de Agua, 1:250.000, Santiago del Estero y Córdoba*. Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR.
- Northrup, C.J., Simpson, C. & Gromet, P., 1998. Early paleozoic history of the Eastern Sierras Pampeanas,

- Argentina. *X Congreso Latinoamericano de Geología*. Buenos Aires, vol. 2:400-403.
- Quartino, B.J., 1967. Contribución a la interpretación y descripción geológica y petrográfica del distrito Ojo de Agua (Sierras de Ambargasta y Sumampa). *Convenio Dirección Provincial de Minería de Santiago del Estero- Minería TEA*, Inedito.
- Ramos, V.A., Cristallini, E.O. y Pérez, D.J., 2002. *The Pampean flat-slab of the Central Andes*, *Journal of South American Earth Sciences*, 15, 59-78.
- Rapela, C.W., Pankhurst, R. y Bonalumi, A., 1991. Edad y geoquímica del pórfido granítico de Oncán, Sierra Norte de Córdoba, Sierras Pampeanas, Argentina. *VI Congreso Geológico Chileno*, Actas I: 19-22.
- Rapela, C.W., Pankhurst, R., Casquet, C., Baldo, E., Saavedra, J., Galindo, C. y Fanning, C.M., 1998. *The Pampean Orogeny of the southern proto-Andean: Cambrian continental collision in the Sierras de Córdoba*, en *The Proto-Andean Margin of Gondwana*. R.J. Pankhurst & C.W. Rapela (Eds.), *Geological Society of London Special Publication 142*: 181-217.
- Schwartz, J. y Gromet, P., 2004. Provenance of a late Proterozoic-Early Cambrian basin, Sierras de Córdoba, Argentina. *Precambrian Research*, 129, 1-21.
- Schwartz, J., Gromet, L.P. y Miró, R., 2003. Neoproterozoic-Early Cambrian calc-alkaline magmatism in the eastern Sierras Pampeanas, Argentina: U-Pb zircon and isotopic constrains. *GSA Meeting*, Seattle, USA.
- Schwartz, J., Gromet, L.P. y Miró, R., 2005. Neoproterozoic-Early Cambrian calc-alkaline magmatism in the eastern Sierras Pampeanas, Argentina: U-Pb zircon and isotopic constrains; *manuscrito finalizado, presentado a Tectonics*.
- Simpson, C., Law, R., Gromet, P., Miró, R. y Northrup, C.J., 2002. Paleozoic deformation in the Sierras de Córdoba and Sierra de Las Minas, eastern Sierras Pampeanas, *Journal of South American Earth Sciences*, 1-16.
- Sims, J., Ireland, T., Camacho, A., Lyons, P., Pieters, P.E., Skirrow, R., Stuart-Smith, P.G. y Miro, R., 1998. *U-Pb, Th-Pb, and Ar-Ar geochronology from the Southern Sierras Pampeanas, Argentina: implications for the Paleozoic tectonic evolution of the western Gondwana margin*, en *The Proto-Andean Margin of Gondwana*. R.J. Pankhurst & C.W. Rapela (eds.), *Geological Society of London Special Publication 142*: 259-281.
- Söllner, F., Leal, P., Miller, H. y Brodtkorb, M.K., 2000. *Eidades U/Pb in circones de la riodacite de la Sierra de Ambargasta, provincia de Córdoba*, en *Mineralogía y Metalogenia*, vol. 6, R. Etcheberry (ed.9, pp. 465-469, INREMI, La Plata.
- Stuart-Smith, P.G., Miró, R., Camacho, A., Sims, J.P., Skirrow, R.G., Lyons, P., Pieters, P.E. y Black, L.P. 1999. *Uranium-lead dating of felsic magmatic cycles in the southern Sierras Pampeanas, Argentina: Implications for the tectonic development of the proto-Andean Gondwana margin*, En: J.D. Keppie y V. Ramos (eds.), *Laurentia-Gondwana Connections before Pangea*, vol. *Special Paper 336*, pp. 87-114, *Geological Society of America*, Boulder.
- Unrug, R., 1992. The supercontinent cycle and Gondwanaland assembly: component cratons and the timing of suturing events. *Journal of Geodynamics*, 16:215-240.

Recibido: 6 de setiembre de 2004

Aceptado: 29 de octubre de 2004