



# GEOCRONOLOGÍA DE LAS SIERRAS DE CÓRDOBA: REVISIÓN Y COMENTARIOS

Edgardo G. BALDO<sup>1</sup>, Carlos W. RAPELA<sup>2</sup>, Robert J. PANKHURST<sup>3</sup>, Carmen GALINDO<sup>4</sup>,  
César CASQUET<sup>4</sup>, Sebastián O. VERDECCHIA<sup>1</sup> y Juan A. MURRA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones en Ciencia de La Tierra (Universidad Nacional de Córdoba - CONICET), Escuela de Geología, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Córdoba. [ebaldo@com.uncor.edu](mailto:ebaldo@com.uncor.edu)

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones Geológicas (Universidad Nacional de La Plata - CONICET), La Plata. [crapela@cig.museo.unlp.edu.ar](mailto:crapela@cig.museo.unlp.edu.ar)

<sup>3</sup>Visiting Research Associate, British Geological Survey, Keyworth, Reino Unido.

<sup>4</sup>Departamento de Petrología y Geoquímica, Universidad Complutense - Instituto de Geociencias (UCM, CSIC), España.

## RESUMEN

La aplicación de diferentes métodos de geocronología isotópica en rocas de las Sierras de Córdoba ha permitido organizar la cronoestratigrafía de las rocas del complejo ígneo-metamórfico, acotando la edad de sedimentación de las rocas paraderivadas, y la edad de los eventos ígneos, deformacionales y metamórficos. La precisión de la información geocronológica ha ido mejorando a través del tiempo debido al avance en las diferentes técnicas de datación radiométrica. Las primeras determinaciones realizadas en las décadas del 60 y 70, utilizando los métodos K-Ar y Rb-Sr, dieron edades neoproterozoicas para el metamorfismo regional (~ 640 Ma), con probables sectores de edades más antiguas (1.250 Ma y 810 Ma) y edades para los eventos magmáticos referidas al Neoproterozoico tardío y Paleozoico. Igualmente para la unidades correspondientes al cratón del Río de la Plata, se determinaron edades K-Ar de ~1.500, ~700 y ~400 Ma. A partir de la década del 90, la aplicación sistemática de metodologías más adecuadas para la datación precisa de eventos metamórficos y de cristalización magmáticos, especialmente los métodos de datación puntual mediante U-Pb en circón y monacita (método SHRIMP, LA-ICPMS) ha establecido nuevos valores geocronológicos para estos eventos. De acuerdo a las nuevas dataciones, las unidades correspondientes al cratón del Río de la Plata quedan restringidas exclusivamente al Paleoproterozoico y en el rango de 2.190–2.080 Ma. Para el sector de las Sierras de Córdoba, la edad de los circones detríticos en las rocas paraderivadas muestra picos estadísticamente relevantes con edades mesoproterozoicas y neoproterozoicas (680–552 Ma y 1.250–1.000 Ma), además de algunas edades de 1.900 a 1.700 Ma. Se destaca la ausencia de edades en el rango de 2.100–2.220 Ma. El pico de edad detrítica de 570 a 552 Ma indica que la sedimentación no puede ser más antigua que el Ediacariano tardío. El magmatismo calco-alcalino vinculado con la orogenia Pampeana, que aflora extensamente en la Sierras Norte y la Sierra Chica de Córdoba, registra un rango de edades de 540 a 515 Ma con un pico de actividad magmática a los 530–535 Ma, siendo a su vez contemporáneo con la deformación que genera milonitas de cinemática dextral. Las edades U-Pb SHRIMP de circones y monacitas provenientes de migmatitas cordieríticas y granitos anatécicos del complejo metamórfico de alto grado muestran edades de 533 a 520 Ma y corresponden al pico térmico del evento metamórfico M<sub>2</sub>. Una edad de 553–543 Ma para un evento metamórfico previo (M<sub>1</sub>) es propuesta en base a edades de borde de los circones detríticos provenientes de gneises de alto grado. El segundo evento magmático registrado en la Sierra de Córdoba corresponde al magmatismo de la orogenia Famatiniana, representado por pequeños plutones de composición trondhjémítica, granodiorítica y tonalítica (magmatismo TTG). Este evento quedaría acotado al Ordovícico Temprano a Medio (478–460 Ma) con un solo dato que sugiere su inicio a los 499 Ma. Las dataciones de las fajas de milonitas sugieren al menos cuatro etapas de formación. El más antiguo corresponde al Cámbrico Temprano, localizado en la Sierra Norte y asociado a fajas de cinemática dextral, el siguiente (pre 478 Ma), correspondería al cabalgamiento Los Túneles, ubicado en la Sierra de Pocho y con vergencia suroeste. Un nuevo evento habría tenido lugar a los 430–428 Ma (post magmatismo TTG), en este evento se formaron las fajas de cizalla más importantes de las sierras, correspondiendo a cabalgamientos de vergencia oeste. Por último, un evento esencialmente frágil con formación de pseudotaquilitas, quedaría acotado a los 355–342 Ma (post-magmatismo de Achala). El tercer evento magmático registrado en las Sierras de Córdoba corresponde al vinculado con la orogenia Achaliana que genera el emplazamiento de las grandes unidades graníticas como la de Achala y Cerro Áspero, además de pequeños plutones. La información geocronológica más reciente y basada en determinaciones U-Pb en circón acota la actividad magmática al Devónico Tardío (366–379 Ma). Las excepciones son el plutón de San José, en la Sierra de Altautina, que con una edad de 413 Ma ubicaría el inicio del magmatismo Achaliano en el Devónico temprano y el plutón de Capilla del Monte, en la Sierra Chica norte, que sugiere una continuación del magmatismo Achaliano en el Carbonífero temprano (336 Ma) o un nuevo ciclo magmático de este período. Con posterioridad al evento de Achala, se reconoce un magmatismo básico, alojados en pequeños diques y con una edad de 309 ± 7 Ma (edad K-Ar roca total). La actividad magmática en las Sierras de Córdoba se reinicia en el Mesozoico a consecuencia de la tectónica extensional que genera el derrame de coladas basálticas y la formación de depósitos piroclásticos. La información geocronológica disponible para este evento corresponde mayoritariamente a dataciones K-Ar de las décadas de los 60' y 70' y sugieren que esta se desarrolló entre los 151 y 117 Ma (Jurásico Tardío

- Cretácico Temprano). Un grupo de edades más jóvenes (76 a 67 Ma) podrían estar referidas a un nuevo pulso volcánico, próximo al límite K-T. Finalmente, durante el Neógeno tiene lugar el magmatismo de intraplaca de la Sierra de Pocho vinculado con la migración al este del arco volcánico andino por efecto de la subducción de bajo ángulo de la placa de Nazca. Las dataciones K-Ar en roca total indican un primer ciclo eruptivo correspondiente al Mioceno ( $7,5 \pm 0,5$  Ma) y otro más joven de edad pliocena ( $5,3 \pm 0,7$  Ma).

**Palabras clave:** Sierras Pampeanas de Córdoba, datación radiométrica, geocronología U-Pb.

### ABSTRACT

**Geochronology in the Sierras de Córdoba: review and assessment.** The application of several geochronological methods to the rocks of the Sierras de Córdoba has led to a revised chronostratigraphy for units of the igneous–metamorphic complex, constraining the age of the metasediment protoliths and the times of igneous, deformational and metamorphic events. The precision of geochronological data has consistently improved with technical advances in radiometric dating. The first determinations, carried out in the 1960s and 1970s, using K-Ar and Rb-Sr methods, suggested a Neoproterozoic age for regional metamorphism (~640 Ma), with some sectors yielding even older ages (1.250 Ma and 810 Ma), and Late Neoproterozoic and Paleozoic ages for the igneous events. At the same time K-Ar ages of ~1.500, ~700 and ~400 Ma were obtained from underlying rocks correlated with the Río de la Plata craton. From the 1990s onwards the systematic application of more suitable methods for the precise determination of metamorphism and magmatic crystallization, especially high spatial-resolution dating using U-Pb in zircon and monazite (SHRIMP and LA-IPMS methods), has disproved some of the older data and established new geochronological control for these events. According to these new results, the age of the basement corresponding to the Río de la Plata is exclusively restricted to the Paleoproterozoic, in the range 2.190 to 2.080 Ma. In the Sierras de Córdoba sector detrital zircon grains in metasedimentary protoliths show statistically significant Mesoproterozoic and Neoproterozoic age peaks (680–552 Ma and 1.250–1.000 Ma) as well as some ages of 1.900 to 1.700 Ma. Paleoproterozoic ages of 2.220–2.100 Ma are not recorded. Another peak between 570 and 552 Ma indicates that sedimentation cannot have been older than late Ediacaran. Calc-alkaline magmatic rocks related to the Pampean orogeny, which occur widely in Sierra Norte and Sierra Chica, yield a range of ages from 540 to 515 Ma with a peak in magmatic activity at 535–530 Ma that is contemporaneous with the deformation that generated mylonites with dextral kinematics. Zircons and monazites from cordierite migmatites and anatectic granites in the high-grade metamorphic complex have U-Pb SHRIMP ages of 533 to 520 Ma and this corresponds to the thermal maximum of the  $M_2$  metamorphism. An age of 553–543 Ma for an earlier metamorphic event ( $M_1$ ) is proposed on the basis of ages from the rims of zircons in the high-grade gneisses. A second igneous episode recorded in the Sierras de Córdoba corresponds to the TTG magmatism of the Famatinian orogeny, represented by small plutons of trondjemitic, granodioritic and tonalitic composition. This event is constrained to the Early to Middle Ordovician (478–460 Ma), with a single date that suggests initiation at 499 Ma. Dating of the mylonite belts suggests at least four stages of formation. The oldest corresponds to Early Cambrian and occurred in Sierra Norte where it is associated with dextral strike-slip. The next stage (pre-478 Ma) corresponds to the NW-thrusting at Los Túneles in the Sierra de Pocho. Another event took place at 430–428 Ma (post-TTG magmatism), in which the most important shear zones in the region were formed, with west-verging thrusting. Finally, an essentially fragile event with the formation of pseudotachylites is fixed at 355–342 Ma (after the Achala magmatism). The third magmatic event recorded in the Sierras de Córdoba was related to the Achalian orogeny, represented by large granitic bodies such as Achala and Cerro Áspero, as well as some small plutons. The most recent geochronological information based on U-Pb zircon dating constrains the age of this magmatic activity to Late Devonian (379–366 Ma). Exceptions are the San José pluton in the Sierra de Altautina, with an age of 413 Ma that fixes the start of Achala magmatism as Early Devonian, and the Capilla del Monte pluton in the northern Sierra Chica, which suggests continuation of Achala magmatism into the Early Carboniferous (336 Ma). Subsequent to the Achala episode, basic magmatism is recognized as small dykes with an age of  $309 \pm 7$  Ma (K-Ar whole rock). Magmatism in the Sierras de Córdoba was reinitiated in the Mesozoic as a consequence of extensional tectonics, resulting in the outpouring of basaltic lavas and the formation of pyroclastic deposits. The available geochronological data for this event is mostly derived from K-Ar dating in the 1960s and 1970s and suggests development between 151 and 117 Ma (Late Jurassic – Early Cretaceous). A group of younger ages (76 to 67 Ma) may represent a new volcanic pulse close to the K-T boundary. Finally, in Neogene times there was intraplate magmatism in the Sierra de Pocho, related to the eastward migration of the Andean volcanic arc due to low-angle subduction of the Nazca plate. Whole-rock K-Ar dating indicates a first eruptive cycle in the Miocene ( $7,5 \pm 0,5$  Ma) and a younger one in the Pliocene ( $5,3 \pm 0,7$  Ma).

**Keywords:** Córdoba Pampean Ranges, radiometric dating, U-Pb geochronology.

## INTRODUCCIÓN

La primera aplicación de la técnica de datación radiométrica en rocas y minerales del complejo ígneo-metamórfico de Córdoba se realizó utilizando pechblendas provenientes

de la mina “Dos Monolitos”, próximo al cerro Champaquí, determinándose una edad de  $4,6 \times 10^9$  años para la formación del planeta mediante el método U-Pb $\alpha$  (Marinesco 1956). Sin embargo, la aplicación sistemática de los métodos de datación radiométricos para conocer la edad de forma-



ción de las rocas de Córdoba, comienzan a realizarse recién a fines de 1960 mediante la aplicación de los métodos de datación K-Ar y Pb- $\alpha$ , correspondiendo los primeros trabajos a Linares (1966), Gordillo y Lencinas (1967), y Linares y Latorre (1969). Durante la década del 1970, en coincidencia con la creación del Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS), se realiza el primer estudio de reconocimiento geocronológico en las grandes unidades del basamento ígneo-metamórfico de Córdoba y San Luis, alcanzando a fin de 1970, un número de 200 muestras con dataciones radiométricas, la mayoría de ellas por el método K-Ar, pero además algunas edades Rb-Sr y Pb- $\alpha$  (cf. Stipanovich y Linares 1975). Los dos trabajos de esta década con mayor trascendencia sobre la edad del complejo plutónico-metamórfico de Córdoba, corresponden a Linares y Cordani (1976) y Cingolani y Varela (1975). Los primeros publican edades K-Ar de 17 muestras de anfibolitas de la Sierra Chica de Córdoba, que dan un espectro de edades desde el Mesoproterozoico al Paleozoico superior ( $1.250 \pm 50$  Ma,  $810 \pm 20$  Ma, 490–580 Ma y 400–460 Ma), en tanto que los segundos autores determinan, mediante isócrona Rb-Sr, una edad de 970 Ma para las anfibolitas, una edad mínima de 640 Ma para el complejo metamórfico (con probables núcleos de 700 y 1.400 Ma), y dos edades de magmatismo; uno tonalítico-diorítico para los 575 Ma y otro a los 325 Ma. Estas edades fueron, durante mucho tiempo, las más citadas en referencia a la edad del basamento metamórfico de Córdoba.

Castellote (1982) realiza nuevas edades K-Ar en el ámbito de la Sierra Norte y sur de la Sierra de Ambargasta, determinado edades del Cámbrico inferior para las unidades plutónicas de esta región. González *et al.* (1985) realizan una síntesis de la distribución geográfico-temporal de la actividad magmática de las Sierras Pampeanas utilizando una selección de 529 edades radiométricas, obteniendo resultados similares a las realizadas anteriormente por Linares y Latorre (1969) y González y Toselli (1974). Estos autores reconocen para las Sierras de Córdoba tres pulsos principales; uno comprendido entre 530–540 y 440–460 Ma que abarca esencialmente la Sierra Norte; otro comprendido entre los 460 y 400 Ma que abarca una pequeña franja al norte de la Sierra de Córdoba, y el tercero ubicado en el resto de la sierra, con valores inferiores a 400 Ma.

A finales de los 90, los nuevos estudios geocronológicos sobre las unidades ígneas y metamórficas de Córdoba se caracterizaron por la incorporación de los avances en las diferentes técnicas geocronológicas. Se realizan las primeras dataciones puntuales U-Pb sobre circones y monacitas me-

dante el método SHRIMP (*Sensitive High Resolution Ion Microprobe*), además de dataciones U-Pb TIMS (*Thermal Ionizations Mass Spectrometry*) sobre circón y titanita, K-Ar y Ar-Ar sobre minerales específicos (hornblenda, biotita, muscovita e illita), e isócronas Rb-Sr y Sm-Nd sobre roca total y minerales con análisis del error a  $2\sigma$  y estimación del ajuste de isócronas (cf. Lyons *et al.* 1997, Galindo *et al.* 1997, Sims *et al.* 1998, Rapela *et al.* 1998, Fantini *et al.* 1998, Gromet y Simpson 1999, Pankhurst *et al.* 2000, Leal *et al.* 2003, Rapela *et al.* 2002, Llambías *et al.* 2003, Millone *et al.* 2003, Schwartz y Gromet 2004). Estas nuevas dataciones permiten definir con mayor precisión la edad de cristalización, metamorfismo y deformación de los eventos tectonotérmicos y magmáticos del Paleozoico de las Sierras de Córdoba, aportando además las primeras evidencias directas sobre la edad de sedimentación de los protolitos paraderivados.

Los trabajos posteriores al 2003 incrementaron notablemente la cantidad de datos geocronológicos en las Sierras de Córdoba, aportando nuevas edades U-Pb y K-Ar que permiten acotar aún más los rangos temporales de los eventos ígneos, metamórficos y de deformacionales registrados en este sector de las Sierras Pampeanas, y consecuentemente a generar modelos de evolución geotectónicas temporalmente más ajustados (cf. Martino *et al.* 2005, Escayola *et al.* 2007, Rapela *et al.* 2007, Rapela *et al.* 2008, Whitmeyer 2008, Schwartz *et al.* 2008, Siegesmund *et al.* 2010, Steenken *et al.* 2010, Drobe *et al.* 2011, Iannizzotto *et al.* 2013).

En esta contribución se presenta una recopilación y un tratamiento crítico de los aportes de geocronología isotópica realizados en las principales unidades geológicas de las Sierras de Córdoba y del subsuelo de la llanura Chacopampeana.

## PALEOPROTEROZOICO: CRATÓN DEL RÍO DE LA PLATA

Las unidades más antiguas de la Provincia de Córdoba corresponden a las del cratón del Río de La Plata (Cuadro 1), una unidad exclusiva del subsuelo de la llanura Chacopampeana sin registro de afloramientos en superficie dentro de la provincia. El conocimiento que se tiene de esta unidad corresponde a muestras de testigos de los pozos de YPF realizados en la década del 70, y las primeras dataciones corresponden a Russo *et al.* (1979), quienes obtienen tres edades K-Ar sobre biotita y roca total; una edad de  $1.516 \pm 150$  Ma para la Diorita de Saira, localizada a 2.068 m de profundidad; otra de  $787 \pm 100$  Ma para el gabro olivínico de Santiago Temple, ubicado a 973 m de profundidad, y la edad de  $441 \pm$

**Cuadro 1:** Síntesis de edades del cratón del Río de La Plata.

Edad (Ma)	Litología	Ubicación (profundidad en metros)	Referencias
<i>Edades K-Ar (en biotita)</i>			
1.516 ± 150	diorita	Saira (-2.608)	Russo <i>et al.</i> (1979)
441 ± 10	granito rosado	Ordoñez (-3.340)	Russo <i>et al.</i> (1979)
787 ± 100	gabro olivínico	Santiago Temple (-973)	Russo <i>et al.</i> (1979)
<i>Edades U-Pb circón (SHRIMP)</i>			
2.162 ± 6	diorita	Saira (-2.608)	Rapela <i>et al.</i> (2007)
2.189 ± 14	esquisto anfibólico	Camino Aldao (-2.200)	Rapela <i>et al.</i> (2007)
2.088 ± 6	granito	Ordoñez (-3.340)	Rapela <i>et al.</i> (2007)

10 Ma para el granito rosado de Ordoñez, a -3.340 m.

Rapela *et al.* (2007), obtienen nuevas edades de cristalización U-Pb SHRIMP sobre circones ígneos provenientes de las mismas muestras aportadas por las perforaciones de YPF. Las nuevas edades son: 2.162 ± 6 Ma (diorita de Saira), 2.189 ± 14 Ma (esquisto anfibólico de Camino Aldao, -2.200 m), y 2.088 ± 6 Ma (granito de Ordoñez). Estas nuevas edades acotan al Paleoproterozoico (Rhyaciano) la edad del magmatismo correspondiente al cratón del Río de Plata en el subsuelo de la Provincia de Córdoba, siendo estas equivalentes a las edades del cratón del Río de La Plata en sus áreas de Tandilia y Uruguay.

### MESOPROTEROZOICO: EL PERÍODO AUSENTE

Las primeras dataciones K-Ar y Rb-Sr sugerían la existencia de eventos magmáticos y metamórficos mesoproterozoicos, entre estas cabe mencionar la edad de 1.250 ± 50 Ma en anfibolitas de la Sierra Chica, reportadas por Linares y Cordani (1976), la edad de 1.400 Ma sugeridas por Cingolani y Varela (1975) y la edad 1.498 Ma para los gneises biotíticos del sector de Río Grande, citada por Ramos (1979), sin embargo, las dataciones posteriores no han podido reproducir las edades antes mencionadas por lo que basados en la información geocronológica actual se debe descartar la existencia de afloramientos de rocas mesoproterozoicas en el ámbito de las Sierras de Córdoba. Las únicas edades mesoproterozoicas registradas corresponden a edades herencia de circones detríticos que son analizados en el apartado correspondiente a la edad de sedimentación de las rocas parade-rivadas.

### ¿NEOPROTEROZOICO?: MAGMATISMO MÁFICO-ULTRAMÁFICO

En las Sierras de Córdoba (Figura 1), las unidades ultramáficas y máficas (peridotitas, harzburgitas, dunitas, lherzolitas, gabros, dioritas, y sus equivalentes metamórficos), afloran de manera discontinua y como pequeños cuerpos en diferentes sectores de las sierras. Tradicionalmente se las dividió en dos fajas principales, la faja occidental (Sierra Grande y borde occidental de Achala) y la faja oriental (Sierra Chica y Sierra de Ischilín; Villar 1985, Escayola 1994, Anzil 2009).

Las unidades del complejo básico y ultrabásico de Córdoba son las que menos información geocronológica registran y además, la información existente merece ser considerada con reserva. Las edades disponibles se sintetizan en el Cuadro 2. Escayola *et al.* (2007) obtuvieron una edad de 647 ± 77 Ma (errocrona Sm-Nd roca total; MSWD = 7,6;  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,51207$  y  $\epsilon\text{Nd}(\text{T}) = + 5,2$ ) para las unidades ultramáficas y máficas de la faja occidental de la Sierra de Comechingones, formadas por peridotitas y piroxenitas intruidas por diques de dunitas y basaltos. Estas unidades son consideradas como partes desmembradas de un complejo ofiolítico asociado a un ambiente de retroarco (Escayola *et al.* 1994). Otras unidades básicas e intermedias han dado edades proterozoicas y paleozoicas, entre éstas cabe mencionar a los gabros del área de Río Grande y Cerro Los Guanacos (Sierra de Comechingones) con edades de 622 a 631 Ma y 512 ± 15 Ma (edades K-Ar en biotita y anfíboles respectivamente, Ramos 1979). Para la diorita de Las Tapias (oeste de la Sierra Grande), se cita una edad K-Ar en anfíbol de 496 ± 15 Ma (Santamaría 1972, catálogo de edades radiométricas).

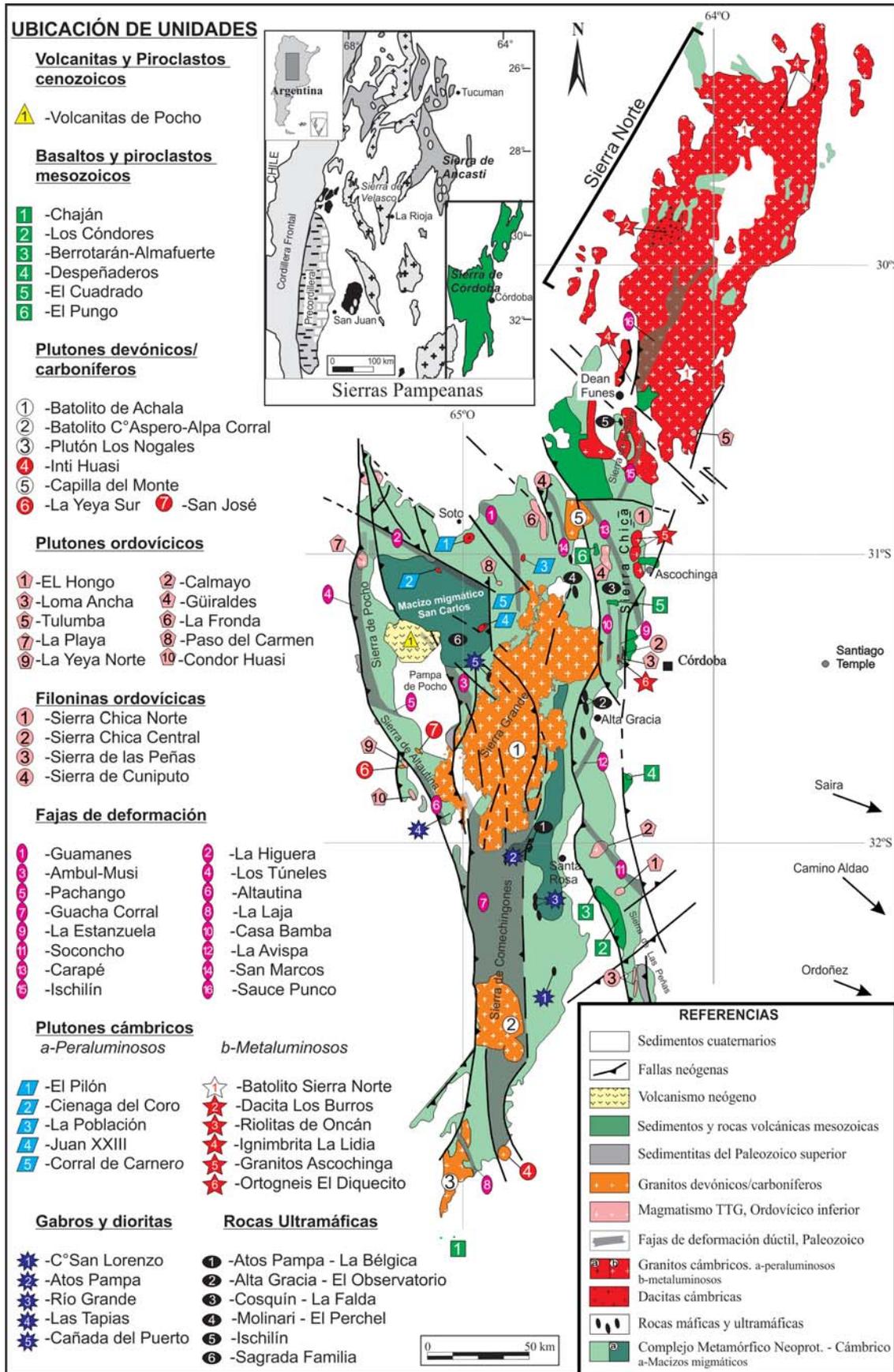


Figura 1: Mapa Geológico de las Sierras de Córdoba y Sierra Norte (modificado de Martino 2003). Ubicación de las unidades litológicas con datación radiométricas citadas en el texto.

**Cuadro 2:** Síntesis de edades de las unidades básicas y ultrabásicas.

<i>Edad (Ma)</i>	<i>Litología</i>	<i>Unidad Geológica</i>	<i>Referencias</i>
<i>Edades K-Ar (en anfíbol y biotita)</i>			
496 ± 15	diorita Las Tapias	Sierra Grande	Santamaría (1972)
512 ± 15	gabros Río Grande	Sierra Grande	Ramos (1979)
622 ± 20*	gabros Río Grande	Sierra Grande	Ramos (1979)
631 ± 20*			
533-433	anfíbolitas	Sierra Chica-Grande-Pocho-Comechingones	Steenken <i>et al.</i> (2010)
<i>Edades Sm-Nd</i>			
647 ± 77	ultrabásicas	Sierra de Comechingones	Escayola <i>et al.</i> (2007)
Nota: * Edades de biotitas			

cas). Tibaldi *et al.* 2008 siguieron que las unidades máficas-ultramáficas de Suya Taco y Sol de Mayo (Sierra de Comechingones) son contemporáneos con granitos anatócticos y granulitas del mismo sector datados en 520 ± 3 Ma (U-Pb en monacita).

A diferencia de las rocas máficas y ultramáficas, las metabasitas clasificadas como anfíbolitas están muy difundidas dentro de las Sierras de Córdoba. Se encuentran como cuerpos tabulares intercalados frecuentemente con mármoles pero también se las reconocen intercaladas con esquistos, gneises y migmatitas. Son particularmente abundantes en la Sierra Chica de Córdoba y están ausentes en las unidades de bajo grado de la Sierra de Pocho, en los esquistos biotíticos de la Sierra de Altautina y en los esquistos de Pichanas. Sobre los anfíboles de estas metabasitas se realizaron un número significativo de dataciones K-Ar (45 dataciones según el catálogo de edades radiométricas anterior a 1987). Los rangos de edades van de 897 a 347 Ma (exceptuando cuatro muestras con edades de 1.200 a 1.280 Ma). Dataciones más recientes mediante Ar-Ar y K-Ar en hornblenda de las anfíbolitas de Córdoba indican edades paleozoicas y en un rango de 533 a 433 Ma (Steenken *et al.* 2010).

Las edades de ~600 Ma de los gabros de la Sierra Grande (K-Ar en biotita), sugeridas por Ramos (1979), presentan valores de potasio muy bajos para biotitas y no deben ser consideradas como referentes geocronológicos. Respecto a las rocas ultrabásica, la edad de 647 Ma obtenida por Escayola *et al.* (2007), debe ser considerada con precaución dado la importante incertidumbre estadística de estos datos (± 77 Ma; MSWD = 7,6). Por último, la mayoría de las edades K-Ar sobre anfíboles de las metabasitas representan edades de

metamorfismo o edades de enfriamiento post-pico metamórfico, por lo que la edad de cristalización de los protolitos de las anfíbolitas ortoderivadas y demás cuerpos básicos de Córdoba es aún desconocido.

#### EDIACARIANO – CÁMBRICO INFERIOR: SEDIMENTACIÓN DE LAS ROCAS PARADERIVADAS

La aplicación sistemática de las metodologías de datación puntual de alta resolución espacial (SHRIMP y LA-ICP-MS) han abierto un amplio espectro de aplicaciones geológicas. Entre las más relevantes se encuentra la identificación de los patrones de herencia en rocas metamórficas paraderivadas, que permite identificar las posibles áreas de procedencia del material clástico y acotar la edad máxima de sedimentación de los protolitos. Entre los minerales potencialmente útiles para retener información de la etapa sedimentaria, el circón es el que ha merecido la mayor atención, debido especialmente a sus particularidades cristal químicas, que lo hacen resistente a la mayoría de los procesos endógenos y exógenos, y además por su amplia distribución litológica y como excelente indicador petrogenético. La combinación de la geocronología puntual de alta resolución espacial, con el análisis morfológico y estructura interna del circón mediante imágenes de cátodo-luminiscencia y de electrones retrodispersados, permiten discriminar porciones de un cristal con diferentes edades.

Los primeros trabajos que aplicaron la datación puntual a las rocas del basamento ígneo-metamórfico de Córdoba son los de Rapela *et al.* (1998) y Sims *et al.* (1998). Los primeros datan circones detríticos en el rango de 578 a 1.509



Ma en la migmatita diatexitica de la quebrada del río Suquía; los segundos, aportaron un patrón completo de edades de herencia en circones provenientes de un gneis granatífero con sillimanita del área de Quilpo. Las edades más jóvenes obtenidas son de 600 a 650 Ma, además de otras dentro del rango de los 650–700 Ma, y escasos circones con edades entre 900–1.100 Ma (Cuadro 3). Pankhurst *et al.* (2000), obtuvieron una decena de edades (SHRIMP) dentro del rango 550–1.150 Ma a partir de los circones de las filitas de la Formación La Mermela (Sierra de Pocho). Estos rangos de edades resultan consistentes con los publicados por Schwart y Gromet (2004), aunque los análisis de estos últimos fueron realizados mediante TIMS sobre una muestra combinada, compuesta por circones provenientes de diferentes unidades de las Sierras de Córdoba.

En el sector de Sierra Norte, Llambías *et al.* (2003) sugieren una edad de sedimentación de  $584 \pm 22/-14$  Ma a partir de los circones provenientes de un nivel ignimbrítico, intercalado con las rocas metasedimentarias de la Formación La Lidia al noreste de Deán Funes (intercepción superior de la concordia, metodología circón U-Pb convencional). Escayola *et al.* (2007) analizan dos muestras de paragneises de la Sierra Chica (una cercana a la localidad de San Agustín y otra del sector de Ascochinga), un paragneis del Complejo migmatítico San Carlos (Sierra Grande septentrional), y una nueva muestra de las filitas del área de Los Túneles en la Sierra de Pocho. En general, estas cuatro muestras exhiben

picos de edades detríticas neoproterozoicas (550–570 Ma, 590–610 Ma, 640–670 Ma, 900–940 Ma) y mesoproterozoicas (1.000–1.090 Ma), con poca participación de edades paleoproterozoicas (*ca.* 1900 Ma) y arqueanas (2.500–2.700 Ma). Drobe *et al.* (2011) analizaron un ortogneis famatiniano del complejo Monte Guazú, localizado al sur de la Sierra de Comechingones, obteniendo picos de edades herencia similares a los anteriores (540, 730–800, 920–1.120 y 1.960 Ma).

En la Sierra Norte de Córdoba (Figura 1), Iannizzotto *et al.* (2013) obtienen patrones de herencia U-Pb SHRIMP de circones provenientes de un paragneis, con la edad del circón más joven de  $559 \pm 7$  Ma, picos de edades de 590–600 Ma, *ca.* 970 Ma y escasos circones con edades cercanas a 1.950 Ma y 2.670 Ma.

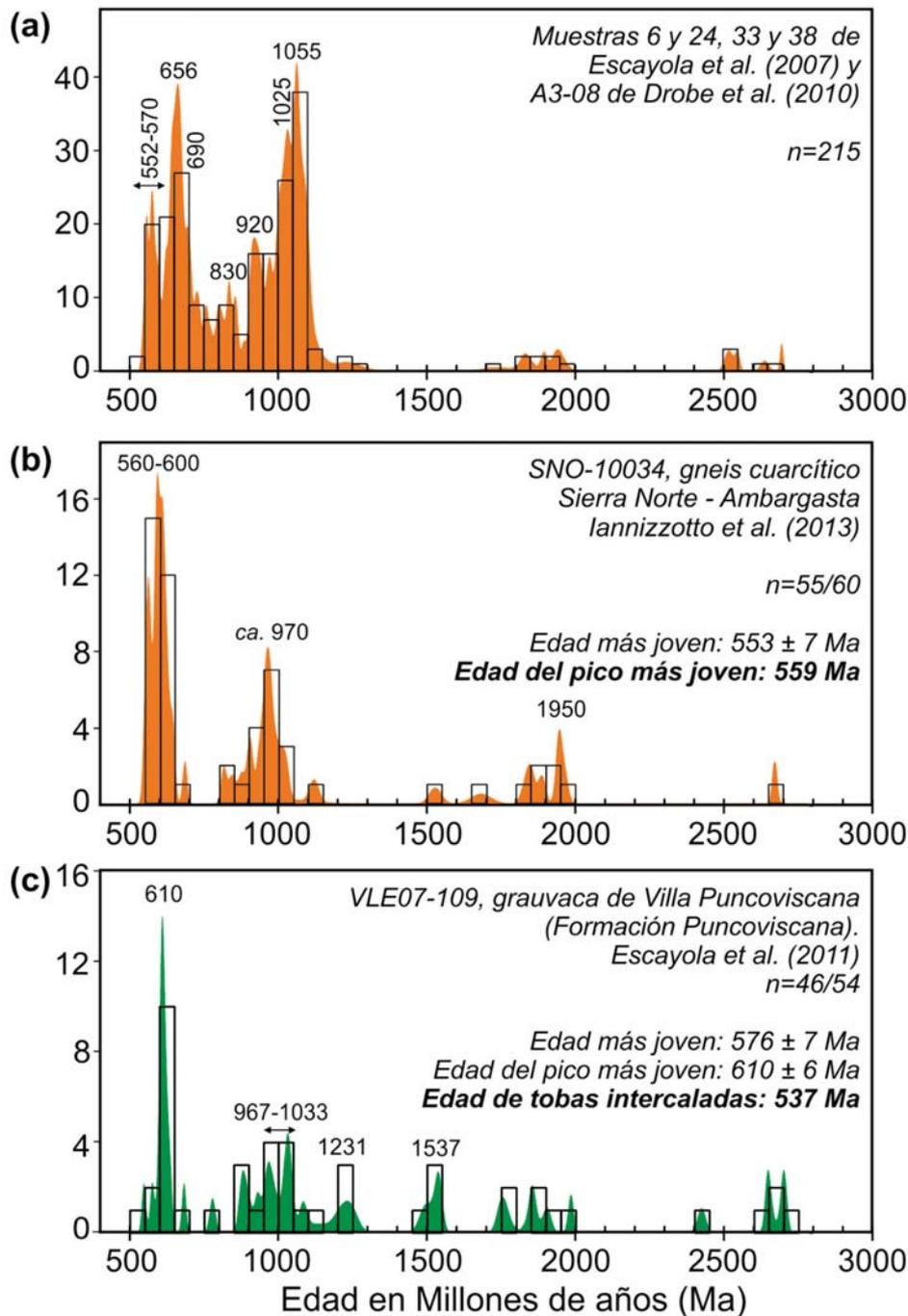
### Interpretación de las edades de circones detríticos

La información actual, proveniente de muestras ubicadas en distintos sectores de las Sierras de Córdoba, sugiere que no hay diferencias sistemáticas y significativas entre los patrones de edades de los circones detríticos que justifique una separación geocronológica de los protolitos sedimentarios. La integración de la información geocronológica aportada por Escayola *et al.* (2007) y Drobe *et al.* (2011), permite construir un único patrón de herencia de las unidades paraderivadas de diferentes sectores de las Sierras de Córdoba (rocas metasedimentarias de la Sierra Chica, Sierra Grande - Comechingones y Sierra de Pocho; Fig. 2a). En todas las

**Cuadro 3:** Síntesis de edades herencia en circones de las rocas metasedimentarias de las Sierras de Córdoba.

Edades herencia (Ma)	Litología/Ubicación	Metodología	Referencias
610-654 842-869 1.268-1.509	diatexitita (1)	U-Pb SHRIMP I en circón	Rapela <i>et al.</i> (1998)
600-650 900-1.100 ~2.500	diatexitita (2)	U-Pb SHRIMP I en circón	Sims <i>et al.</i> (1998)
542-550 600-700 905-1.150	filita (3)	U-Pb SHRIMP I en circón	Pankhurst <i>et al.</i> (2000)
$584 \pm 22$	metaignimbrítica (4)	U-Pb convencional en circón	Llambías <i>et al.</i> (2003)
~600-700 950-1.050 ~1.900	gneis y esquisto, Complejo Pichanas (5)	U-Pb TIMS en circón	Schwart y Gromet (2004)
550-570 590-670 900-1.090 2.500-2.700	gneis-migmatita-filita (1, 3 y 6)	U-Pb SHRIMP y TIMS en circón	Escayola <i>et al.</i> (2007)
540-730-800-920-1.120-1.960	ortogneis (6)	U-Pb SHRIMP en circón	Drobe <i>et al.</i> (2011)
585-600-990-1.067-1.100-2.200-2.700	gneis-metatexitas- diatexitas (3, 5, 6)	U-Pb SHRIMP en circón	Siegesmund <i>et al.</i> (2010)
560- 600-970-1.950-2.670	paragneis (4)	U-Pb SHRIMP en circón	Iannizzotto <i>et al.</i> (2013)

Nota: (1) Sierra Chica, (2) Sierra de Quilpo, (3) Sierra de Pocho, (4) Sierra Norte, (5) Sierra Grande norte, (6) Sierra de Comechingones.



**Figura 2:** Distribución de edades U-Pb en circones detríticos pertenecientes a unidades metamórficas de las Sierras de Córdoba y Formación Puncoviscana. a) Diagrama integral de distribución de edades detríticas de metasedimentos compuesto por las muestras de Escayola *et al.* (2007,  $n = 3$ ) y Drobe *et al.* (2011,  $n = 1$ ). b) Distribución de edades detríticos de una metamorfita paraderivada de Sierra Norte correspondiente a Iannizzotto *et al.* (2013). c) Distribución de edades detríticas de la Formación Puncoviscana en su sección tipo (modificado de Escayola *et al.* (2011)). Para la construcción de estos diagramas se utilizaron las edades  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  para el rango  $<1.100$  Ma y para edades  $>1.100$  Ma las edades  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ . Fueron descartados los análisis con alta discordancia o altas concentraciones de plomo común.

muestras se reconocen picos estadísticamente relevantes con edades neoproterozoicas y mesoproterozoicas (680–552 Ma y 1.250–1.000 Ma), escasas edades de 1.900 a 1.700 Ma, y no se registran edades paleoproterozoicas en el rango de 2.100–2.220 Ma.

El pico de edad estadísticamente relevante de 552 a 570

Ma (Fig. 2), sugiere que la sedimentación no puede ser más antigua que el Ediacariano superior. Circones con edades menores ( $\sim 542$  Ma), como los registrados en las rocas metasedimentarias de bajo grado de la Formación La Mermela (Pankhurst *et al.* 2000, Escayola *et al.* 2007), no constituyen un pico de edad estadísticamente relevante si no que corres-



ponden a datos puntuales y como tales poco representativos para establecer la edad máxima de sedimentación. Igualmente la edad de 542 Ma, citada por Drobe *et al.* (2011) como la edad del circón más joven del ortogneis de Monte Guazú, en la Sierra de Comechingones, tendría una interpretación muy discutible por tratarse de un gneis retrabajado en el Ordovícico (edades de borde de circón de 493 a 427 Ma).

En el sector austral de la Sierra Norte, la edad de sedimentación de  $584 \pm 22/-14$  Ma, propuesta por Llambías *et al.* (2003), basada en la determinación U-Pb convencional de circones provenientes de una metaignimbrita intercalada con las rocas metasedimentarias de bajo grado de la Formación La Lidia (noreste de Deán Funes), debe considerarse con interrogantes dado que la metodología de datación empleada no permite descartar la presencia de circones con edades heredadas. Además, la edad informada corresponde a una intercepción superior de la concordia con un significativo error en el ajuste. Para el sector más boreal de la Sierra Norte de Córdoba, la edades herencias provenientes de un paragneis muestran una distribución de picos equivalentes al resto de las Sierras de Córdoba, reconociendo como pico de edades más jóvenes en circones el de  $\sim 560$  Ma (Fig. 2c, Iannizzotto *et al.* 2013).

Las rocas metasedimentarias de la Provincia de Córdoba fueron correlacionados con la Formación Puncoviscana (*e.g.* Schwart y Gromet 2004, Rapela *et al.* 2007, Steenken *et al.* 2010). Sin embargo, Escayola *et al.* (2011) obtuvieron una edad de sedimentación de  $537,3 \pm 0,9$  Ma (Cámbrico inferior) a partir de la datación U-Pb TIMS en circones provenientes de una metatoba ubicada en la localidad tipo de la Formación Puncoviscana (*v* Fig. 2b). Para el mismo sitio, las metagrauvas asociadas presentan una edad de  $576 \pm 7$  Ma para el circón más joven. En base a las edades actualmente disponibles, aportada por los circones detríticos de las unidades paraderivadas de las Sierras de Córdoba y Sierra Norte, es posible asumir una edad de sedimentación no más antigua que 570 Ma; a su vez, considerando que las edades más antiguas del magmatismo plutónico de Sierra Norte son  $\sim 541$  Ma (ver discusión más adelante) y que estas se intruyen en las rocas metasedimentarias antes consideradas, la edad de sedimentación de los protolitos paraderivados quedaría restringida al Ediacariano superior (entre los 570–541 Ma) siendo por lo tanto más antiguos que los de la Formación Puncoviscana en su localidad tipo (Casquet *et al.* 2012, Iannizzotto *et al.* 2013).

Otro hecho relevante de los protolitos sedimentarios de los complejos metamórficos de las Sierras de Córdoba y que

ha sido puesto de manifiesto por Schwart y Gromet (2004), Rapela *et al.* (2007) y Steenken *et al.* (2010), es la ausencia en el registro de herencia de edades paleoproterozoicas equivalentes al cratón del Río de La Plata (edades comprendidas entre los 2,0–2,2 Ga, Rapela *et al.* 2007), cuestionando las interpretaciones paleogeográficas del Cámbrico inferior que postulan el desarrollo de una cuenca de margen pasivo sobre esta unidad cratónica.

## CÁMBRICO INFERIOR: METAMORFISMO Y MAGMATISMO DEL CICLO PAMPEANO

### Magmatismo calco-alcálico del arco Pampeano

El arco magmático Pampeano aflora extensamente al norte y este de la localidad de Deán Funes, conformando el complejo plutónico-subvolcánico de Sierra Norte-Ambargasta (Lucero Michaut 1979, Lira *et al.* 1997, von Gosen y Prozzi 2010, y demás bibliografía allí citada). Así mismo se reconocen unidades plutónicas asignadas a este mismo evento en la Sierra de Ischilín y en la Sierra Chica de Córdoba (*cf.* Kirschbaum *et al.* 1997, Rapela *et al.* 1998, Candiani *et al.* 2001, Iannizzotto *et al.* 2012). Las unidades plutónicas de este complejo ígneo están compuestas de granitos, granodioritas y tonalitas mientras que las unidades hipabisales y subvolcánicas corresponden a pórfidos riolíticos, dacitas, andesitas y andesitas basálticas. Geoquímicamente corresponden a granitoides tipo-I, metaluminosos y calco-alcálicos (Lira *et al.* 1997, Rapela *et al.* 1998, Leal *et al.* 2003, Millone *et al.* 2003). En relación a las fajas de cizalla de este sector, es factible separar las unidades ígneas en pre- a sin-miloníticas. Los primeros son granitos porfíricos metaluminosos con transiciones a granitos peraluminosos, y los post-miloníticos son granitos equigranulares y levemente peraluminosos (Iannizzotto *et al.* 2012).

Las unidades plutónicas de Sierra Norte fueron primeramente datadas por Castellote (1982) y González *et al.* (1985) quienes obtienen edades K-Ar y Pb- $\alpha$  en el rango de  $557 \pm 15$  Ma a  $440 \pm 20$  Ma, pero mayoritariamente entorno a los 500–520 Ma (*cf.* Cuadro 4). Una edad de  $494 \pm 11$  Ma para los intrusivos ácidos de Oncán fue obtenida por Rapela *et al.* (1991) mediante, isócrona Rb-Sr, (MSWD = 2,2, Ri = 0,7109). La primera edad de cristalización de  $533 \pm 2$  Ma (U-Pb en circón publicada por Rapela *et al.* 1998), corresponde a la granodiorita con hornblenda-biotita de Tres Lomitas (parte central de Sierra Norte). Trabajos posteriores informan edades más jóvenes para el magmatismo de Sierra Norte;  $515 \pm 4$  Ma (granito deformado de Ojo de Agua, Stuart-Smith *et*

**Cuadro 4:** Síntesis de edades correspondientes al magmatismo calco-alcalino del arco Pampeano.

Edad (Ma)	Litología	Unidad Geológica	Referencias
<i>Edades K-Ar (roca total)</i>			
550 ± 20 499 ± 20	dacita-granitos	Cº Los Burros, Sierra Norte	Castellote (1986)
440 ± 20 557 ± 26	conjunto variado de rocas plutónicas	Sierra Norte y Sierra Chica	González <i>et al.</i> (1985)
527 ± 21	intrusivo riolítico	Eº La Lidia, Sierra Norte	Massabié <i>et al.</i> (2002)
514	dacita	Arroyo Los Escondidos, Sierra Norte	Koukharsky <i>et al.</i> (2003)
<i>Edades Rb-Sr</i>			
494 ± 11	pórfido riolítico	Oncán, Sierra Norte	Rapela <i>et al.</i> (1991)
600–630	granodiorita-granito-dacita-riolita	Sierra Norte	Millone <i>et al.</i> (2003)
523 ± 4,4	intrusivos miarolíticos	Puesto de los Caminos, Sierra Norte	Millone <i>et al.</i> (2003b)
<i>Edades U-Pb circón (SHRIMP y TIMS)</i>			
528 ± 2	Granodiorita	Sierra Chica norte	Rapela <i>et al.</i> (1998)
520 ± 25	pegmatitas	pegmatita Las Tapias	Linares (1966)
515 ± 4	granito deformado	Ojo de Agua, Sierra Norte	Stuart-Smith <i>et al.</i> (1999)
533 ± 2	granodiorita (Hbl-Bt)	Tres Lomitas, Sierra Norte	Rapela <i>et al.</i> (1998)
557 ± 4	riodacita	Cº Los Burros, Sierra Norte	Söllner <i>et al.</i> (2000)
518 ± 4	dacita	Cº Los Burros, Sierra Norte	Leal <i>et al.</i> (2003)
584 + 22/-14	metaignimbrita	Fm. La Lidia, Sierra Norte	Llambías <i>et al.</i> (2003)
Máx. 554 ± 7 Mín. 541 ± 12	granodiorita-dacita-monzogranitos	Sierra Norte	Schwartz <i>et al.</i> (2008)
~525	granodiorita (Hbl-Bt) deformada	Sierra de Las Peñas	Schwartz <i>et al.</i> (2008)
Máx. 533 ± 12 Mín. 492 ± 4	ortogneis	San Miguel, Sierra Norte	Siegesmund <i>et al.</i> (2010)
537 ± 4	granodiorita (Hbl-Bt)	Sierra de Ischilín	Iannizzotto <i>et al.</i> (2013)
530 ± 4	granito Villa Albertina	Sierra de Ischilín	Iannizzotto <i>et al.</i> (2013)

*al.* 1999), 518 ± 4 Ma (dacita Los Burros, Leal *et al.* 2003), 514 Ma y 527 ± 21 Ma (intrusivos dacíticos y riolíticos; edades K-Ar, Koukharsky *et al.* 2003 y Massabié *et al.* 2002, respectivamente), y también edades más antiguas de 600–630 Ma, 584 +22/-14, 557 ± 4 Ma, 554 ± 7 Ma y 541 ± 12 Ma, correspondientes a granitos, meta-ignimbritas y granodioritas (Millone *et al.* 2003, Llambías *et al.* 2003, Söllner *et al.* 2000 y Schwartz *et al.* 2008). Igualmente, la edad K-Ar de 567 ± 16 Ma correspondiente a una corneana de la Sierra de Ambargasta (Koukharsky *et al.* 1999) sugiere la existencia de un magmatismo plutónico de esa edad. Nuevas dataciones U-Pb SHRIMP en circón confirman la presencia de un magmatismo entorno a los 530 Ma. Siegesmund *et al.* (2010) determinan un edad de 533 ± 12 Ma para un ortogneis en tanto que Iannizzotto *et al.* (2013) obtienen una edad de 537 ± 4

Ma para granitos pre-miloníticos y de 530 ± 4 Ma para granitos post-miloníticos.

En el ámbito de la Sierra Chica de Córdoba, la edad del magmatismo calco-alcalino del Cámbrico inferior es menos conocida. Rapela *et al.* (1998) obtuvieron una edad de 529 ± 2 Ma (circón U-Pb TIMS) para la granodiorita del sector de Ascochinga (Sierra Chica norte), y una edad de 535 ± 4 Ma para el ortogneis granatífero de la quebrada del río Suquia (Sierra Chica central). Schwartz *et al.* (2008), informan una edad de ~525 Ma para la granodiorita deformada con hornblenda-biotita de la Sierra de Las Peñas (continuación sur de la Sierra Chica). Las edades mencionadas permiten confirmar la continuación hacia el sur del arco magmático calco-alcalino de Sierra Norte.



### Discusión de las edades del arco magmático calco-alkalino

La información geocronológica disponible sugiere que el inicio de la actividad magmática del arco calco-alkalino de las Sierras de Córdoba podría ubicarse entre 600 y 580 Ma y el cierre de esta actividad a los ~500 Ma. Sin embargo, como ya fue discutido, las edades de 600–630 Ma (errocrona Rb-Sr, Millone *et al.* 2003) deben ser consideradas con reserva al igual que la edad de 580 Ma correspondiente a la metaignimbrita de la formación La Lidia (Llambías *et al.* 2003). Por otra parte, la edad de  $557 \pm 4$  Ma del intrusivo riódacítico Los Burros (Söllner *et al.* 1991), corresponde a una edad de intercepción superior de la concordia obtenida mediante U-Pb TIMS y podría no representar la edad de cristalización de esta unidad. Se debe considerar además la complejidad interna mostrada por los circones de esta unidad (Leal *et al.* 2003). Igualmente la edad  $554 \pm 7$  Ma de Schwartz *et al.* (2008) corresponde a una edad en discordia, siendo la de  $541 \pm 12$  Ma (del mismo autor) la que muestra un mejor ajuste, pudiendo ser esta última el registro geocronológico más antiguo de este magmatismo calco-alkalino de Sierra Norte. Con respecto al cierre del magmatismo de arco, este parece estar dado por la edad de los intrusivos ácidos como los pórfidos de Oncán de  $494 \pm 11$  Ma, la dacita Los Burros de  $518 \pm 4$  Ma y los intrusivos riolíticos de  $527 \pm 21$  Ma (Rapela *et al.* 1991; Leal *et al.* 2003; Massabié *et al.* 2002). Dentro de este rango, está también la edad de  $515 \pm 4$  Ma del granito de Ojo de Agua (Stuart-Smith *et al.* 1999). La edad mínima de 492 Ma estimada para el ortogneis San Miguel (Siegesmund *et al.* 2010) no tiene el suficiente respaldo en los datos presentados. De acuerdo con esto, un rango de edades de 541 a 515 Ma parecer ser el más adecuado para acotar la actividad magmática principal del arco calco-alkalino en las Sierras de Córdoba, pero con un pico de actividad magmática a los 530–535 Ma, que es además contemporáneo con la deformación milonítica de cinemática dextral (Iannizzotto *et al.* 2013).

### Metamorfismo regional del complejo orto y paraderivado

Tal como se mencionó en la introducción, los primeros trabajos geocronológicos sobre el basamento metamórfico de las Sierras de Córdoba le asignaban edades esencialmente neoproterozoicas (Cuadro 5, datos de Cingolani y Varela 1975, Linares y Cordani 1976; edades Rb-Sr y K-Ar). Por su parte, Castellote (1985) aporta edades K-Ar cámbricas y neoproterozoicas para el basamento metamórfico de Sierra Norte; una edad de  $530 \pm 20$  Ma para el esquisto de La Totorá;  $568 \pm 20$  Ma para el gneis de San Miguel;  $598 \pm 20$  Ma

para el esquisto en San Pedro, y  $517 \pm 15$  Ma para el sector de La Clemira (límite con Santiago de Estero); en tanto que Koukharsky *et al.* (1999) citan, para el mismo sector, una edad K-Ar de  $567 \pm 16$  Ma.

Nuevas edades para el basamento de alto grado del sector de las Sierras de Córdoba comenzaron a ser publicadas a finales de la década del 90. Sims *et al.* (1998), obtienen una edad Th-U SHRIMP de  $526 \pm 11$  Ma en monacitas provenientes de un gneis de dos micas del Complejo Pichanas, y una edad U-Pb de  $529 \pm 10$  Ma en circones provenientes de un gneis granatífero del sector de Quilpo. Estas edades son similares a las obtenidas por Rapela *et al.* (1998), quienes para el área del río Suquía (Sierra Chica central), citan edades U-Pb SHRIMP de  $522 \pm 8$  Ma y Pb-Th de  $534 \pm 7$  Ma en monacitas de la diatexita cordierítica, y una edad U-Pb de  $533 \pm 2$  Ma en circones de un gneis granatífero. Los mismos autores citan además, una edad U-Pb de  $529 \pm 2$  Ma en circones de un gneis metaluminoso del sector La Cumbre-Ascochinga. Fantini *et al.* (1998), publican una edad U-Pb TIMS de  $509 \pm 2$  Ma para una titanita proveniente de un mármol del sector del Saucecito, y Gromet y Simpson (1999) y Gromet *et al.* (2005) obtienen dos edades U-Pb TIMS en monacitas; una de 515 Ma correspondiente al paragneis del sector de Paso del Carmen (Sierra Grande norte), y otra de  $520 \pm 2$  Ma proveniente de un leucosoma migmatítico de la región de Suya Taco (Sierra Grande sur).

Siegesmund *et al.* (2010) aportan nuevas edades para un conjunto variado de rocas del basamento metamórfico de las Sierras de Córdoba. Edades U-Pb SHRIMP de  $543 \pm 41$  Ma para los bordes de circones provenientes del gneis granatífero de Las Palmas (Macizo de San Carlos occidental), de  $530 \pm 13$  Ma para la granulita aluminosa de Santa Rosa (Sierra Grande sur), y de  $554 \pm 3$  Ma para la metatexita de Tala Cruz (Sierra Grande sur). Informan además, edades U-Pb SHRIMP de  $577 \pm 11$  Ma en circones de la diatexita cordierítica de Cañada del Sauce (Sierra Grande sur) y de  $496 \pm 2$  Ma para diatexita cordierítica del Macizo de San Carlos (Sierra Grande norte). También aportan edades Pb/Pb SHRIMP de  $506 \pm 7$  Ma y  $506 \pm 26$  Ma en titanitas provenientes de gneises calcosilicáticos del Macizo de San Carlos y de mármoles del grupo Yacanto, respectivamente. Y finalmente, edades Pb/Th de  $507 \pm 6$  Ma correspondiente a la monacita de la granulita con cordierita-granate-antofilita del río Santa Rosa.

Para el evento metamórfico de bajo grado, representado por las filitas cloríticas del borde occidental de la Sierra de Pocho, Rapela *et al.* (1998) le asignan tentativamente una

**Cuadro 5:** Síntesis de edades correspondiente al evento metamórfico regional de las Sierras de Córdoba.

<i>Edad (Ma)</i>	<i>Litología</i>	<i>Unidad Geológica/localidad</i>	<i>Referencia</i>
<i>Edades U-Pb y Pb-Th en circón (SHRIMP y TIMS)</i>			
529 ± 10	Paragneis granatífero	Complejo Quilpo	Sims <i>et al.</i> (1998)
533 ± 2	Ortogneis	Quebrada del río Suquía, Sierra Chica central	Rapela <i>et al.</i> (1998)
543 ± 4	M <sub>1</sub> Gneises granatíferos sin cordierita	Gneis Las Palmas	Siegesmund <i>et al.</i> (2010)
496 ± 9	M <sub>2</sub> Diatexitita cordierítica	Macizo San Carlos	Siegesmund <i>et al.</i> (2010)
577 ± 11	M <sub>2</sub> Diatexitita cordierítica	Cañada del Sauce	Siegesmund <i>et al.</i> (2010)
553 ± 3	M <sub>1</sub> Estromatita granatífera	Tala Cruz	Siegesmund <i>et al.</i> (2010)
530 ± 13	M <sub>1</sub> Granulita	Macizo de Santa Rosa	Siegesmund <i>et al.</i> (2010)
<i>Edades U-Pb, Pb-Th y Pb-Pb en Monacita (SHRIMP y TIMS)</i>			
534 ± 7 522 ± 8	Diatexitita cordierítica	Qda. del río Suquía, Sierra Chica central	Rapela <i>et al.</i> (1998)
526 ± 11	Paragneis Bt + Ms	Complejo Pichanas	Sims <i>et al.</i> (1998)
520 ± 2	Leucosoma granítico	Suya Taco, Sierra de Comechingones	Gromet <i>et al.</i> (2005)
~515	Gneis pelítico	Paso del Carmen	Gromet y Simpson (1999)
507 ± 6	Granulita	Macizo de San Carlos	Siegesmund <i>et al.</i> (2010)
<i>Edades U-Pb y Pb-Pb en Titanita (SHRIMP y TIMS)</i>			
509 ± 2	Mármol	El Saucecito	Fantini <i>et al.</i> (1998)
506 ± 7	Gneis calco-silicático	Macizo San Carlos	Siegesmund <i>et al.</i> (2010)
506 ± 26	Mármol	Yacanto	Siegesmund <i>et al.</i> (2010)
<i>Edades Rb-Sr (roca total)</i>			
~640	ortogneises y paragneises	Sierra Chica de Córdoba	Cingolani y Varela (1975)
525 ± 18	filitas y esquistos	Sierra de Pocho	Rapela <i>et al.</i> (1998)
<i>Edades K-Ar (roca total y anfíbol)</i>			
580-600	Anfibolitas	Sierra Chica	Linares y Cordani (1976)
530 ± 20	Esquisto micáceo	La Totorá, Sierra Norte	Castellote (1985)
568 ± 20	Gneis	San Miguel, Sierra Norte	Castellote (1985)
517 ± 15 <sup>®</sup>	Cornubianita	La Clemira, Sierra Norte	Castellote (1985)
567 ± 16 <sup>®</sup>	Cornubianita	La Clemira, Sierra Ambargasta (Sgo. del Estero)	Koukharsky <i>et al.</i> (1999)
Nota: <sup>®</sup> Edades según roca total			

edad de metamorfismo de 525 ± 18 Ma (errocrona Rb-Sr con muestras de esquistos del complejo Pichanas y filitas de la formación La Mermela, MSWD = 25).

### Granitos anatócticos del complejo migmatítico paraderivado

Vinculado al pico térmico del evento metamórfico que genera las migmatitas cordieríticas, se originan también gra-

nitos peraluminosos ricos en cordierita y sillimanita, dando lugar a cuerpos plutónicos que se emplazan en niveles relativamente someros de la corteza (3–4 kbar, Rapela *et al.* 2002). Para estas unidades plutónicas, Lyons *et al.* (1997) obtienen una edad de ~527 Ma en el granito de Pichanas; Rapela *et al.* (1998) determinan una edad de 523 ± 2 Ma para el granito del Pilón, y para el mismo cuerpo, Stuart-Smith *et al.* (1999) citan un rango de edades de 527–514 Ma para las



facies porfíricas y equigranulares. Finalmente, Escayola *et al.* (2007) citan una edad de  $529 \pm 3,4$  Ma para el granito peraluminoso/diatexita del Macizo de San Carlos y Tibaldi *et al.* (2008) una edad de  $520 \pm 3$  Ma para un granito anatóctico vinculado a las unidades máficas-ultramáficas de Suya Taco (Cuadro 6).

### Discusión de las edades del metamorfismo regional

La nueva generación de datos geocronológicos que comenzaron a ser frecuentes a fines de 1990 y principios del 2000, no corroboran la existencia de edades de cristalización y metamorfismo paleoproterozoicas y neoproterozoicas como lo sugerían los trabajos de las décadas de los 70' y 80'. Los nuevos datos son convergentes en acotar al Cámbrico inferior la edad más antigua para el metamorfismo regional de grado alto de las Sierras de Córdoba, que además está asociada a la generación de migmatitas cordieríticas y granitos peraluminosos. Las edades U-Pb SHRIMP sobre circones y monacitas provenientes de migmatitas con cordierita-granate-sillimanita-feldespato potásico y granitos anatócticos con cordierita y sillimanita, muestran edades de 533 a 520 Ma. (Sims *et al.* 1998, Rapela *et al.* 1998, Stuart-Smith *et al.* 1999, Gromet *et al.* 2005, Siegesmund *et al.* 2010). La edad de 515 Ma de la monacita de Paso del Carmen (Gromet y Simpson, 1999, dos granos en concordia) y las edades de 509 a 506 Ma obtenidas en titanitas podrían representar el inicio de un nuevo evento térmico vinculado con el ciclo Famatiniano (Siegesmund *et al.* 2010) o la extensión del metamorfismo pampeano (Fantini *et al.* 1998).

Una propuesta diferente respecto a la edad del metamorfismo regional ha sido planteada por Siegesmund *et al.* (2010), a partir de la datación U-Pb SHRIMP de bordes de circones provenientes de gneises granatíferos con sillimanita, metatexitas sin cordierita y diatexitas cordieríticas. Estos autores proponen un primer evento metamórfico de alto grado a los 553–543 Ma correspondiente a la etapa de acortamiento y engrosamiento cortical, seguido de una etapa de extensión y anatexis de baja presión con formación de migmatitas diatexíticas y granitos anatócticos a los ~530 Ma. La edad de  $543 \pm 3,6$  Ma basada en siete datos de circones provenientes del gneis Las Palmas, con zonación oscilatoria y relaciones Th/U de 0,4 a 0,9 es atribuida a este primer evento al igual que la edad de  $553 \pm 3,2$  Ma correspondiente a los circones de la metatexita con granate de Tala Cruz. Sin embargo, para este mismo sector, la diatexita de Cañada Sauce, que representaría el evento más joven y que además contiene *rafts* de estromatitas consideradas remanentes de la metatexita de Tala Cruz, presenta circones con una edad de  $577 \pm 11$  Ma, contradiciendo las relaciones de campo observadas y el esquema planteado por los autores. Cabe la posibilidad de que los circones con edades > 550 Ma, interpretados como metamórficos, correspondan en realidad a la fracción clástica del protolito. Por último, los mismos autores indican una edad de  $496 \pm 9$  Ma para la diatexita del macizo de San Carlos, considerada como un reajuste del sistema U-Pb durante el ciclo Famatiniano.

La evolución post-pico térmico de los complejos metamórficos del ciclo Pampeano ha sido establecida mediante

**Cuadro 6:** Síntesis de edades correspondientes al magmatismo peraluminoso del Cámbrico Inferior.

Edades Ma	Litología	Ubicación	Referencias
<i>Edades U-Pb en circón (SHRIMP)</i>			
~527	granito peraluminoso	Pichanas	Lyons <i>et al.</i> (1997)
$523 \pm 2$	granito porfírico peraluminoso	Complejo El Pilón	Rapela <i>et al.</i> (1998)
~527-514	granitos anatócticos porfírico y equigranular	Complejo El Pilón	Stuart-Smith <i>et al.</i> (1999)
$529 \pm 3,4$	granito peraluminoso	Macizo San Carlos	Escayola <i>et al.</i> (2007)
$496 \pm 9$	Diatexita	Macizo San Carlos	Siegesmund <i>et al.</i> (2010)
<i>Edades U-Pb en monacita (TIMS)</i>			
$520 \pm 3$	granito anatóctico	Suya Taco, Sierra de Comechingones	Tibaldi <i>et al.</i> (2008)
<i>Edades Rb-Sr</i>			
$523 \pm 4$	granitos y cordierititas	Complejo El Pilón	Rapela <i>et al.</i> (1998)

la determinación de edades K-Ar en anfíboles, muscovitas y biotitas provenientes de sectores no involucrados en las dos fajas principales de cizalla (faja Los Túneles y Guacha Corral). Edades K-Ar de  $513 \pm 5$  Ma en anfíbol y de 498 a 474 Ma en muscovita, indican una velocidad de enfriamiento de  $\sim 9$  °C/Ma Pampeano y una tasa de levantamiento de  $\sim 0,1$  mm/año (Steenken *et al.* 2010).

### ORDOVÍCICO INFERIOR: MAGMATISMO TTG DEL CICLO FAMATINIANO

Las unidades metamórficas e ígneas del Cámbrico inferior a medio son intruidas por plutones post-cinemáticos de dimensiones reducidas (1 a 5 km de diámetro), y por una compleja red de intrusivos filonianos distribuidos en diferentes sectores de las Sierras de Córdoba, pero particularmente abundantes en la Sierra Chica. Este nuevo evento magmático está representado por la asociación trondhjemita-tonalita-granodiorita y geoquímicamente caracterizado por su alto contenido en Na, relaciones Rb/Sr muy bajas (0,015–0,012) y  $\epsilon$ Nd variable entre -4 y +0,9 (magmatismo TTG de Rapela *et al.* 1998). Los plutones de este evento fueron emplazados en niveles de corteza superior, pre- a sin-cinemáticos con el desarrollo de fallas sinestrales (D'Eramo *et al.* 2006).

El Cuadro 7 sintetiza las edades correspondientes a este evento. La más antigua corresponde al plutón trondhjemítico de Güiraldes de  $499 \pm 6$  Ma (Sierra Chica norte, edad U-Pb SHRIMP en circón) publicada por Rapela *et al.* (1998). Los mismos autores citan además una edad U-Pb en monacita de  $438 \pm 9$  Ma.

Una edad U-Pb SHRIMP de  $478 \pm 8$  Ma correspondiente al Plutón La Playa, ubicado en el borde noroccidental de las Sierras de Córdoba, ha sido publicada por Pankhurst *et al.* (2000), en tanto que edades de  $474 \pm 5$  Ma (circón U-Pb TIMS) y  $474 \pm 6$  Ma (isócrona Rb-Sr) corresponden a los plutones granodioríticos de Paso del Carmen y de La Fronda (Sierra Grande, Gromet y Simpson 1999 y Rapela *et al.* 1998, respectivamente). Para los plutones menores e intrusivos filonianos del sector de Sierra Chica central, un grupo de edades U-Pb TIMS en circón de  $469 \pm 23$  Ma,  $467 \pm 11$  Ma,  $464 \pm 7$  Ma y  $459 \pm 4$  Ma han sido reportadas por Miró y Gromet (2005). En la Sierra de Altautina, borde sur occidental de las Sierras de Córdoba, el plutón granítico de la Yeya Norte registra una edad de  $471 \pm 9/-32$ , (Edad U-Pb circón, Sfragulla, 2013). Finalmente, un conjunto de edades K-Ar obtenidas sobre muscovitas y biotitas de los plutones La Fronda, Loma

Ancha y El Hongo, registran edades post-cristalización de  $455 \pm 15$  Ma,  $456 \pm 15$  Ma,  $434 \pm 22$  Ma, respectivamente (Massabié 1982, Linares y Gonzáles 1990, D'Eramo, *et al.*, 1999). Cabe mencionar también las edades K-Ar de  $475 \pm 22$  Ma a  $409 \pm 17$  Ma, y 442 a 435 Ma correspondientes a muscovitas de pegmatitas de la Sierra Chica y Sierra del Cuniputo publicadas por Galliski y Linares (1999) y Rapela *et al.* (1998).

En el ámbito de Sierra Norte el registro de este evento está poco caracterizado. Baldo *et al.* (1998) asignan con cierta duda una edad Rb-Sr de  $434 \pm 39$  Ma al granito muscovítico del plutón Tulumba, que intruye discordantemente al granito porfírico milonitizado del magmatismo cámbrico.

### Comentario sobre el magmatismo ordovícico

El magmatismo TTG de las Sierras de Córdoba se correlaciona regionalmente con el magmatismo de arco del evento orogénico Famatiniano que tiene mayor expresión al oeste, conformando grandes extensiones de unidades magmáticas como las de sierras de Chepes, Ulapes y Valle Fértil. La edad  $499 \pm 6$  Ma para la trondhjemita Güiraldes es la única referencia geocronológica que asigna el comienzo del magmatismo Famatiniano al Cámbrico superior. Por otro lado, los intrusivos riolíticos de Oncán con edad Rb-Sr de  $494 \pm 11$  Ma, estarían geoquímicamente desvinculados del magmatismo TTG y ligados al magmatismo de arco Pampeano. El resto de la información geocronológica indica que el magmatismo TTG de las Sierras de Córdoba está circunscrito al Ordovícico Inferior a Medio, entre los 478 a 460 Ma. Las edades más jóvenes que 455 Ma, correspondientes a edades K-Ar en biotitas y muscovitas, parecen responder a una apertura del sistema por deformación postcristalina combinada con edades de enfriamiento.

### EDAD DE LAS FAJAS DE CIZALLA PALEOZOICAS

En las Sierras de Córdoba y Sierra Norte fueron contabilizadas dieciséis fajas de deformación dúctil (Simpson *et al.* 2003, Martino 2003 y bibliografía allí citada), estas se caracterizan por la formación de milonitas en sentido amplio, generadas a partir de diferentes protolitos ígneos y metamórficos, y bajo diferentes condiciones de esfuerzo y temperatura. La datación directa de los eventos de deformación dúctil presenta una serie de dificultades metodológicas, por lo que la edad de la deformación en muchos casos, debe ser acotada en relación a las edades de cristalización de los even-

**Cuadro 7:** Síntesis de edades del magmatismo TTG del Ordovícico inferior en las Sierras de Córdoba.

Edad (Ma)	Litología	Unidad Geológica	Referencias
<i>Edades U-Pb circón y monacita (SHRIMP y TIMS)</i>			
474 ± 5	granodiorita	Plutón Paso del Carmen	Gromet y Simpson (1999)
499 ± 6	trondhjemita	Plutón Güiraldes	Rapela et al. (1998)
438 ± 9*	trondhjemita	Plutón Güiraldes	Rapela et al. (1998)
478 ± 8	granodiorita	Plutón La Playa	Pankhurst et al. (2000)
469 ± 23	gneis tonalítico	Sierra Chica, El Diquecito	Miró y Gromet (2005)
459 ± 4	ortogneis	Sierra Chica, La Huerta	Miró y Gromet (2005)
464 ± 7	diorita	Sierra de Las Peñas	Miró y Gromet (2005)
467 ± 11	cuarzo diorita	Las Tunas, Sierra Chica	Miró y Gromet (2005)
471+9/-32	monzogranito	Plutón La Yeya Norte	Sfragulla (2013)
<i>Edades Rb-Sr</i>			
434 ± 39	granito muscovítico	Plutón Tulumba, Sierra Norte	Baldo et al. (1998)
474 ± 6	granodiorita	Plutón La Fronda	Rapela et al. (1998)
<i>Edades K-Ar en biotita y muscovita</i>			
455 ± 15 <sup>®</sup>	granodiorita	Plutón La Fronda	Massabié (1982)
456 ± 15	granito muscovítico	Plutón Loma Ancha	Linares y González (1990)
434 ± 22 <sup>®</sup>	tonalita	Plutón El Hongo	D'Eramo et al. (1999)
442 - 435	pegmatitas	Sierra de Cuniputo	Rapela et al. (1998)
409 ± 17 475 ± 22	pegmatitas	Sierra Chica	Galliski y Linares (1999)
Nota: * Edad monacita, y <sup>®</sup> Edad biotita			

tos magmáticos involucrados en la deformación o posteriores a ésta. Las edades que pueden ser asignadas a los eventos de deformación dúctil de las Sierras de Córdoba han sido compiladas en el Cuadro 8.

En el ámbito de la Sierra de Ischilín y Sierra Norte se reconocen milonitas con cinemática de desgarre dextral formadas a partir de los granitos del arco magmático del Cámbrico inferior. Las milonitas están localizadas en dos fajas principales de rumbo noreste que reciben el nombre de Faja de Ischilín, al sur de Deán Funes, y Sauce Punco al norte de esa localidad (Gordillo et al. 1997, Martino et al. 1999, Iannizzotto et al. 2013). La edad de la faja de cizalla Ischilín ha sido acotada entre los 538 y 528 Ma mediante la datación U-Pb SHRIMP en circón de los granitos sin- a pre-milonitización y post-milonitización (Iannizzotto et al. 2013).

En el borde occidental de la Sierra de Pocho, la faja de cizalla Los Túneles de rumbo nor noreste y cinemática inversa,

presentan milonitas y protomilonitas en facies de anfibolita a esquistos verdes con desarrollo de pseudotaquilitas tardías (Martino 2003, Simpson et al. 2003, Martino et al. 2006). La datación K-Ar sobre anfíbol de  $534 \pm 13$  Ma, proveniente de un litoclasto de anfibolita dentro de la faja de cizalla, probablemente corresponda a una edad relictica del evento metamórfico regional y representaría una edad máxima de actividad de esta faja (Steenken et al. 2010), en tanto que la edad más joven estaría acotada por el plutón La Playa/Charquina de  $478 \pm 8$  Ma que interrumpe la foliación milonítica en su tramo norte (Pankhurst et al. 2000, Martino 2003). También se registran edades más jóvenes de 433–430 Ma obtenidas mediante dataciones K-Ar en muscovita y biotita de las milonitas de esta faja (Steenken et al. 2010). Edades K-Ar de 365–373 Ma sobre anfíboles (Rapela et al. 1998) y Ar-Ar de  $345 \pm 5$  Ma y  $348 \pm 2$  Ma sobre las pseudotaquilitas de este sector (Whitmeyer 2008), corresponderían a las etapas de

**Cuadro 8:** Síntesis de edades correspondientes a las fajas de formación dúctil de las Sierras de Córdoba.

<i>Edad Ma</i>	<i>Tipo de roca</i>	<i>Faja de Cizalla</i>	<i>Referencias</i>
<i>Edades Ar-Ar en muscovita, biotita, anfíbol y roca total</i>			
355 - 370*	milonita	Las Lajas	Camacho (1997)
440 <sup>‡</sup>	anfíbolitas	La Estanzuela, Sierra Chica este	Rapela <i>et al.</i> (1998b)
358 ± 2 <sup>©</sup>	milonita	Guamanes	Sims <i>et al.</i> (1998)
365 - 451*	milonita	Guamanes	Sims <i>et al.</i> (1998)
428 ± 12 <sup>©</sup>	pseudotaquilitas	La Estanzuela, Sierra Chica este	Northrup <i>et al.</i> (1998)
365 ± 10 <sup>©</sup>	pseudotaquilita	La Puerta, Sierra Grande norte	Northrup <i>et al.</i> (1998)
<i>Edades Ar-Ar puntual por ablación laser</i>			
429,3 ± 3,5	pseudotaquilita	La Estanzuela, Sierra Chica este	Whitmeyer (2008)
345 ± 5 348 ± 2	pseudotaquilita	Los Túneles, Sierra de Pocho	Whitmeyer (2008)
340 ± 5 342 ± 5	ultramilonita	Tres Árboles, Sierra Grande	Whitmeyer (2008)
<i>Edades K-Ar en anfíbol y muscovita</i>			
365- 373 <sup>‡</sup>	anfíbolitas	Los Túneles	Rapela <i>et al.</i> (1998)
442 - 435*	pegmatitas deformadas	Carapé y Cuniputo	Rapela <i>et al.</i> (1998)
534 ± 13 <sup>‡</sup>	anfíbolita	Los Túneles	Steenken <i>et al.</i> (2010)
419 ± 10*	pegmatita	Pachango	Steenken <i>et al.</i> (2010)
486 ± 10*	pegmatita milonitizada	Guacha Corral	Steenken <i>et al.</i> (2010)
447 ± 11 <sup>‡</sup>	anfíbolita	Guacha Corral	Steenken <i>et al.</i> (2010)
Nota: * Edades en muscovita, <sup>‡</sup> Edades en anfíbol, <sup>©</sup> Edades en biotita, <sup>®</sup> Edades de roca total			

reactivaciones de esta faja. Estas últimas edades son coincidentes con la edad de 358 ± 2 Ma correspondiente a la faja de cizalla Guamanes de la Sierra Grande-Norte (Ar-Ar en muscovita, Sims *et al.* 1998). Finalmente, la faja de cizalla Pachango, que corta el tramo sur de la faja Los Túneles (Martino 2003), ha sido acotada en 419 ± 10 Ma (edad K-Ar en muscovita, Steenken *et al.* 2010).

En la Sierra Chica norte, la faja de cizalla Carapé, de rumbo noroeste y cinemática inversa (Pérez *et al.* 1996, Lyons *et al.* 1997, Martino 2003), tendría una edad de 442–435 Ma obtenida a partir de la datación K-Ar en muscovitas de pegmatitas sindeformacionales (Rapela *et al.* 1998).

En el borde oriental de la Sierra Chica central, la faja de cizalla La Estanzuela, de rumbo norte y cinemática inversa, presenta milonitas de alta temperatura y venas de pseudotaquilitas tardías cortando la foliación milonítica (Simpson *et al.* 2001, Martino 2003). Las milonitas se forman a partir de

las unidades metamórficas del Cámbrico inferior (~520 Ma) y la edad Ar-Ar de 440 Ma correspondiente a anfíboles de este sector (Rapela *et al.* 1998), junto con las edades Ar-Ar de 428 ± 12 Ma (Northrup *et al.* 1998) y 429 ± 3,5 Ma (Whitmeyer 2008, fusión laser) obtenidas a partir de las pseudotaquilitas, acotarían al Silúrico la edad de la deformación de esta faja. En concordancia con esto, el plutón granítico precinemático de Loma Ancha registra una edad K-Ar sobre muscovita de 447 ± 15 Ma (Linares y González 1990).

La faja de cizalla Guacha Corral (según Martino 2003) o el tramo sur de la faja Tres Árboles (según Whitmeyer y Simpson 2004), es la más importante de las Sierras de Córdoba, y se ubica en la parte central de la Sierra Grande, entre los batolitos devónicos de Achala (al norte) y Cerro Áspero - Alpa Corral (al sur). Se trata de un cabalgamiento con vergencia al oeste (Simpson *et al.* 2003). La edad de inicio de esta faja es claramente pre-devónica dado que la foliación



milonítica es cortada por los granitos de Achala y Cerro Áspero de  $\sim 370$  Ma. Edades K-Ar de  $486 \pm 10$  Ma y  $447 \pm 11$  Ma corresponden a muscovitas provenientes de pegmatitas milonitizadas y de anfíboles dentro de la faja (Steenken *et al.* 2010). Deformaciones posteriores al magmatismo de Achala han sido documentadas mediante la datación Ar-Ar puntual de material vítreo en ultramilonitas obteniendo edades de  $340 \pm 5$  Ma y  $342 \pm 5$  Ma (Whitmeyer 2008).

### Comentario sobre la edad de las fajas de cizalla

La información geocronológica proveniente de las fajas de deformación dúctil de la Provincia de Córdoba sugiere al menos cuatro eventos de formación de milonitas y rocas asociadas. El más antiguo, de 538 a 528 Ma, corresponde a los desgarres dextrales contemporáneos con la actividad del arco magmático de Sierra Norte (Iannizzotto *et al.* 2013). El segundo evento, pre 478 Ma, corresponde a cabalgamientos de vergencia al suroeste, representado por la faja de cizalla Los Túneles en la Sierra de Pocho y Guacha Corral en la Sierra de Comechingones (Martino 2003, Simpson *et al.* 2003, Steenken *et al.* 2010). El tercer evento de deformación dúctil habría tenido lugar a los 430–428 Ma (post magmatismo TTG); en este último evento se generan las fajas de cizalla de mayor desarrollo, vinculadas con cabalgamientos de vergencia oeste. Por último, reactivaciones de las anteriores fajas o un nuevo evento deformacional produce pseudotaquilitas con edades de 355–342 Ma (post-magmatismo de Achala, Northrup *et al.* 1998).

### DEVÓNICO SUPERIOR: MAGMATISMO GRANÍTICO DE ACHALA

El tercer evento magmático en el ámbito de las Sierras de Córdoba, se corresponde con la formación de nuevas unidades plutónicas de dimensiones batolíticas como el de Achala, ubicado en la Sierra Grande, y el de Cerro Áspero-Alpa Corral, localizado más al sur, en la Sierra de Comechingones. También se reconocen cuerpos menores como el plutón Los Nogales, en la Sierra de Comechingones, el plutón San José y La Yeya Sur, en la Sierra de Altautina y el de Capilla del Monte, en la Sierra Chica (Sims *et al.* 1998, Otamendi *et al.* 2004, Murra y Baldo 1996, Sfragulla 2013). Asociado a estas unidades plutónicas se reconocen una importante red de intrusivos filonianos pegmatíticos y aplíticos (Galliski 1994, Morteani *et al.* 1995).

Este evento definido como Achaliano (Sims *et al.* 1998), se caracteriza por la generación de monzogranitos peralu-

minosos (equigranulares y porfíricos) con una signatura geoquímica de granitos tipo A, ricos en flúor y fósforo, y con mineralizaciones de uranio, fluorita y wolframio asociada (Lira y Kirschbaum 1990, Saavedra *et al.* 1998, Coniglio *et al.* 2000, Rapela *et al.* 2008, Dahlquist *et al.* 2013).

El Cuadro 9 resume las edades obtenidas para el magmatismo Achaliano. Las primeras dataciones K-Ar en muscovita de estos granitos y pegmatitas indicaban edades de 300 a 330 Ma (Linares y Latorre 1969). Para los granitos de Achala se determinó una errocrona Rb-Sr de  $398 \pm 24$  Ma (Rapela *et al.* 1982). Nuevas isócronas Rb-Sr y con mejores ajustes definen edades de  $337 \pm 30$  Ma y  $358 \pm 9$  Ma para las facies granulares y porfíricas del sector norte del batolito de Achala [MSWD = 1,1 y 1,3; RI (relación inicial) = 0,7169 y 0,7126, Rapela *et al.* 1991]. La primera edad de cristalización de  $368 \pm 2$  Ma, realizada mediante U-Pb convencional en circones provenientes de los nódulos biotíticos alojados en los granitos del sector de Altas Cumbres, corresponde a Dorais *et al.* (1997). Posteriormente, Rapela *et al.* (2008) confirman esta edad obteniendo dos nuevas dataciones de  $369 \pm 3$  Ma y  $379 \pm 4$  Ma mediante metodología U-Pb SHRIMP, en este caso sobre circones provenientes de las facies monzograníticas porfíricas y tonalíticas del sector del Altas Cumbres. Finalmente Dahlquist *et al.* (2013), determinan tres nuevas edades de  $366 \pm 6$  Ma,  $372 \pm 6$  Ma y  $369 \pm 3$  Ma mediante metodología U-Pb LA-ICP-MS en circón.

Para el sector sur de la Sierra de Comechingones, Pinotti *et al.* (2006) determinan para el batolito de Cerro Áspero una edad de  $369 \pm 9$  Ma mediante isócrona Rb-Sr (MSWD = 0,86 RI = 0,7069) y otras de  $389 \pm 19$  y  $379 \pm 18$  Ma mediante K-Ar en muscovita. Para el mismo sector, Stuart Smith *et al.* (1999) le asignan al granito del plutón Los Nogales una edad de  $382 \pm 6$  Ma mediante U-Pb SHRIMP en circón. En la Sierra de Pocho sur y Altautina, Sfragulla (2013) determina una edad de  $413 + 17/-20$  Ma para el plutón San José y de  $375 + 15/-12$  Ma para el Plutón La Yeya Sur, ambas corresponden a edades U-Pb en circón realizados mediante zonda iónica con errores a 1 sigma y porcentajes de discordia elevados. En el Plutón de Capilla del Monte, Saavedra *et al.* (1998) determinan una edad de  $336 \pm 2,4$  Ma (MSWD = 1; RI = 0,7086) correspondiente a una isócrona Rb-Sr realizada con doce muestras de las facies granulares y porfíricas de esta unidad.

La información geocronológica disponible sobre las unidades graníticas del magmatismo de Achala y demás plutones contemporáneos, indican que esta actividad magmática está acotada al Devónico superior (366–379 Ma). Las excep-

**Cuadro 9:** Síntesis de edades correspondientes al magmatismo de Achala.

Edad (Ma)	Tipo de roca	Ubicación	Referencias
<i>Edades K-Ar en roca total y muscovita</i>			
300 a 330	granitos granulares y porfíricos	diferentes sectores del Batolito de Achala	Linares y Latorre (1969)
389 ± 19 379 ± 18	granitos muscovíticos	Batolito de Cerro Áspero, Sierra Comechingones	Pinotti <i>et al.</i> (2006)
<i>Edades Rb-Sr</i>			
398 ± 24	granitos granulares y porfíricos	sector de Altas Cumbres, Achala central	Rapela <i>et al.</i> (1982)
337 ± 30 358 ± 9	granitos granulares y porfíricos	sector de Characato- Mesa del Palmar, Achala Norte	Rapela <i>et al.</i> (1991)
336 ± 2,4	granitos granulares y porfíricos	plutón Capilla del Monte, Sierra Chica Norte	Saavedra <i>et al.</i> (1998)
369 ± 9	granitos muscovíticos	batolito de Cerro Áspero, Sierra Comechingones	Pinotti <i>et al.</i> (2006)
<i>Edades U-Pb en circón (métodos SHRIMP, LA-ICPMS e IMS)</i>			
368 ± 2	nódulos biotíticos	sector Altas cumbres, Achala central	Dorais <i>et al.</i> (1997)
382 ± 6	granitos	plutón Los Nogales, Sierra de Comechingones	Stuart Smith <i>et al.</i> (1999)
369 ± 3 379 ± 4	granito porfírico y tonalita	sector Altas cumbres, Achala Central	Rapela <i>et al.</i> (2008)
413 +17/-20	monzogranito	Plutón San José, Sierra de Pocho sur	Sfragulla (2013)
375 +15/-12	monzogranito	Plutón La Yeya Sur, Sierra de Altautina	Sfragulla (2013)
366 ± 6 372 ± 6 369 ± 3	granitos granulares y porfíricos	sector Altas cumbres y Los Gigantes, Batolito de Achala	Dahlquist <i>et al.</i> (2013)

ciones son el plutón de San José, en la Sierra de Altautina, que con una edad de 413 Ma ubicaría el inicio del magmatismo Achaliano en el Devónico inferior y el plutón de Capilla del Monte, en la Sierra Chica norte, que sugiere una continuación del magmatismo Achaliano en el Carbonífero inferior (Misisipiano superior) o un nuevo ciclo magmático de este período.

Desvinculados genéticamente del evento magmático de Achala pero intruyendo los granitos de este evento se reconocen una serie de intrusivos básicos diferenciados en diques lamprofíricos de edad desconocida (Daziano 1986) y basaltos shoshoníticos (mugarita) de  $309 \pm 7$  Ma (datación K-Ar roca total, Caprano *et al.* 2012).

### MESOZOICO: COLADAS LÁVICAS, INTRUSIVOS FILONIANOS Y OLEADAS PIROCLÁSTICAS

En el borde oriental de la Sierra Chica de Córdoba, intercalados con las sucesiones sedimentarias continentales compuesta de lutitas, areniscas rojas, conglomerados y ni-

veles de yeso, se reconocen mantos lávicos de basaltos alcalinos ricos en potasio y secuencias piroclásticas. En el mismo sector pero intruyendo el basamento ígneo-metamórfico, se observan diques de traquibasaltos, conductos semicirculares y restos de aparatos volcánicos. En el sur oeste de la provincia, dentro de la región de llanura, se reconocen pequeños centros volcánicos monogénicos, cúpulas dómicas y conos de escorias que apenas resaltan de la planicie pampeana, y están compuestos de basaltos alcalinos ricos en nefelina. Tanto los anteriores como éstos, evidencian una actividad magmática extrusiva ligada a una etapa extensional intracontinental (Gordillo y Lencinas 1967, Viramonte *et al.* 1994, Sánchez y Bermúdez 1997, Ancheta *et al.* 2002, Lagorio 2008).

Una edad de 117–124 Ma para esta actividad magmática ha sido primeramente definida por Gordillo y Lencinas (1967) mediante la datación K-Ar roca total, referida a los traquibasaltos de la Sierra de Los Cóndores. Dataciones posteriores de González y Toselli (1975) y Linares y Valencio (1974, 1975), correspondientes a los intrusivos y coladas del



sector oriental de la Sierra Chica, Sierra de Los Cóndores y dique Los Molinos, indican edades de 62–151 Ma (K-Ar en roca total). Para los basaltos nefelínicos del sector sur (cerro La Leoncita) se registran edades más jóvenes, de 67 a 76 ± 5 Ma (dataciones K-Ar en flogopita, Lucassen *et al.* 2002, y K-Ar en roca total, Santa Cruz 1980). Para este período se reconocen también venas de fluoritas vinculadas a zonas de alteración episeníticas dentro del batolito de Achal con edades de 117 ± 26 Ma y 131 ± 22 Ma (isócrona Sm-Nd, Galindo *et al.* 1997). Finalmente, una edad paleógena de 55 ± 2 Ma (K-Ar roca total) correspondiente a una nefelinita olivínica intruida en el borde occidental del granito de Achala, ha sido publicada por Gordillo *et al.* (1983).

La información geocronológica disponible para este período (Cuadro 10), mayoritariamente basada en dataciones K-Ar de la década de los 60' y 70', indicaría que la actividad magmática extensional del Mesozoico se desarrolló entre los 151 y 117 Ma (Jurásico Superior - Cretácico Inferior). Un grupo de edades más jóvenes de 76 a 67 Ma, referidas a las unidades magmáticas ubicadas en el extremo sur oeste de las Sierras de Córdoba, podrían indicar un pulso volcánico más joven y próximo al límite K-T (Cretácico Superior-Terciario), incluso extenderse al Paleógeno si se considera que la nefelinita olivínica de 55 Ma es geoquímicamente afín a este evento.

### NEÓGENO: VOLCANISMO DE POCHO

La actividad magmática más moderna para el ámbito de las

Sierras de Córdoba corresponde a la generación de domos, conductos lávicos y piroclastos, que afloran exclusivamente en la Sierra de Pocho (Olsacher 1960, Gordillo y Linares 1982). Este magmatismo de intraplaca de composición calco-alcalina rica en K y shoshonítica, ha sido vinculado con la migración hacia el este del arco magmático andino en respuesta a la subducción de bajo ángulo de la Placa de Nazca (Kay y Gordillo 1994).

Las únicas edades disponibles de este evento corresponden a ocho dataciones K-Ar sobre roca total (Gordillo y Lencinas 1981, cuadro 11). Se reconocen dos grupos de edades; uno de 7,9 ± 0,6 a 7 ± 0,6 Ma formado por las laciandesitas cuarcíferas de la serie calco-alcalina aflorantes en el cerro Bola, Las Lecheras, Los Congos y Yerba Buena; otro de 6 ± 0,4 a 4,7 ± 0,3 Ma, integrado por las laciandesitas cuarcíferas de la serie shoshonítica de los cerros Velis, Ciénaga, Poca y del Burro. Los dos conjuntos de edades han sido referidas a dos isócronas, una de 7,5 ± 0,5 Ma (Mioceno tardío) y otra de 5,3 ± 0,7 Ma (Plioceno). Cabe mencionar que las muestras de mayor edad son las que presentan un mayor contenido de Ar<sup>40</sup> atmosférico (entre 84 y 53 %).

### COMENTARIO FINAL

Los aportes de la geocronología isotópica al fechado de los eventos ígneos, deformacionales y metamórficos realizados por diferentes metodologías y grupos de trabajos a lo largo de más de 70 años de investigación permiten calificar a las Sierras de Córdoba como una de las mejores conocida

**Cuadro 10:** Síntesis de edades correspondientes al magmatismo máfico del Mesozoico.

Edad Ma	Tipo de roca	Ubicación	Referencias
<i>Edades K-Ar roca total y flogopita</i>			
117-124	coladas de traquibasaltos	Sierra de Los Cóndores	Gordillo y Lencinas (1967)
62-151	diques de traquibasaltos	Sierra de Los Cóndores, Sierra Chica sur	Linares y Valencio (1974)
141 ± 10	diques de traquibasaltos	Los Molinos	Linares y Valencio (1975)
~67*	basaltos nefelínicos	Cerro La Leoncita	Lucassen <i>et al.</i> (2002)
76 ± 5	basaltos nefelínicos	Cerro La Leoncita	Santa Cruz (1980)
55 ± 2	nefelinita olivínica	Estancia Guasta, Cumbre de Gaspar	Gordillo <i>et al.</i> (1983)
<i>Edad Sm-Nd</i>			
117 ± 26 131 ± 22	mena de fluorita	Cabalango y Alpa Corral, Sierra Grande	Galindo <i>et al.</i> (1997)
Nota: * Edad en flogopita			

**Cuadro 11:** Síntesis de edades correspondientes al magmatismo cenozoico de las Sierras de Córdoba.

Edad (Ma)	Tipo de roca	Ubicación	Referencias
<i>Edades K-Ar en roca total</i>			
4,7 ± 0,3 5,5 ± 0,3	Laciandesitas de la serie calcoalcalina	Volcanes neógenos, Sierra de Pocho	Gordillo y Linares (1981)
7,0 ± 0,6 7,9 ± 0,6	Laciandesitas de la serie shosonítica	Volcanes neógenos, Sierra de Pocho	Gordillo y Linares (1981)

desde el punto de vista geocronológico dentro del ámbito de las Sierras Pampeanas.

El estado actual del conocimiento geocronológico y el análisis crítico de la información isotópica disponible, permite realizar la siguiente síntesis cronoestratigráfica de eventos:

**1-** Las rocas magmáticas más antiguas corresponden al Paleoproterozoico (~2.162–2.088 Ma) y se vinculan con el cratón del Río de La Plata, presentes únicamente en el basamento de la llanura Chacopampeana.

**2-** La edad de sedimentación de al menos una parte de los protolitos paraderivados del complejo metamórfico quedaría acotada al Ediacariano superior (560–541 Ma).

**3-** Un primer evento metamórfico de alto grado con formación de gneises y migmatitas estromatíticas habría tenido lugar a los 553–543 Ma. La existencia y edad de este evento necesitaría de precisiones y confirmaciones en el futuro.

**4-** La edad del magmatismo máfico y ultramáfico es aún poco conocida y la información disponible no permite ser conclusivo.

**5-** La actividad del magmatismo calco-alcalino del arco Pampeano quedaría restringida al Cámbrico inferior (~541–528 Ma).

**6-** En el sector de Sierra Norte, la edad del primer evento de deformación dúctil con cinemática de desgarre dextral queda acotada al Cámbrico inferior (538 y 528 Ma). Este evento deformacional afecta los granitos calco-alcalinos del arco pampeano.

**7-** Para el sector de las Sierras de Córdoba, la edad del evento deformacional mas antiguo, que genera milonitas asociadas a cabalgamientos de vergencia suroeste, corresponde al Cámbrico inferior-Ordovícico (~534–478 Ma) y se reconoce en la faja de cizalla Los Túneles y Guacha Corral.

**8-** La etapa de metamorfismo regional de alto grado con formación de migmatitas cordieríticas y granitos anatéticos corresponde al Cámbrico inferior a medio (~520–515 Ma).

**9-** El segundo ciclo de actividad magmática (magmatismo TTG del ciclo Famatiniano) se habría iniciado en el Cám-

brico superior y extendido al Ordovícico Inferior a Medio (~499–459 Ma).

**10-** La segunda etapa de deformación dúctil con desarrollo de importantes fajas de cizalla de cinemática inversa, estaría acotado al Silúrico inferior a medio (~440–428 Ma).

**11-** El tercer evento magmático de importancia corresponde al ciclo Achaliano del Devónico Superior (~382–366 Ma). Este magmatismo podría haberse iniciado en el Devónico inferior (413 Ma) y extenderse al periodo Carbonífero. Ambas afirmaciones deben ser corroboradas con mejores datos.

**12-** Formación de nuevas fajas de cizalla y reactivaciones de las anteriores quedarían acotadas al Devónico Superior - Carbonífero inferior (~370–340 Ma).

**13-** Un probable evento extensional asociado con la intrusión de filones máficos habría tenido lugar en el Carbonífero superior (~309 Ma). No obstante, este evento necesita ser corroborado con más evidencias geocronológicas.

**14-** El evento extensional más importante, con extrusión de coladas basálticas, tendría un primer pulso acotado al periodo Jurásico Superior-Cretácico Inferior (151–117 Ma) y un nuevo ciclo para el Cretácico Superior - Paleógeno inferior (76–67 Ma), con posibilidades de extenderse hasta el Mioceno.

**15-** El último evento magmático de las Sierras de Córdoba, localizado en la Sierra de Pocho y vinculado con el magmatismo de intraplaca del margen andino, quedaría acotado al Neógeno y según las dataciones K-Ar de roca total, se registra un primer ciclo eruptivo correspondiente al Mioceno (7,5 ± 0,5 Ma) y otro al Plioceno (5,3 ± 0,7 Ma).

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es una contribución a los proyectos CONICET PIP N° 112-201101-00229, CGL2009-07984/BTE de España y SECyT UNC 2012/2013. Se agradece al Dr. Miguel Basei los comentarios y sugerencias realizados durante el arbitraje del trabajo.



## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Ancheta, D., Sánchez, M. y Marclé R. 2002. Petrografía y Geoquímica de las volcanitas de la Formación El Saucecito (Cretácico Inferior), Córdoba, Argentina. 15° Congreso Geológico Argentino. Actas 2: 158–163. Calafate.
- Anzil, P. 2009. Metamorfismo, deformación y evolución tectónica de rocas ultramáficas y su encajonante metamórfico asociado en la Sierra Chica Central, Córdoba, Argentina. Tesis Doctoral, Hemeroteca de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. (Inédita). 336 p. Córdoba.
- Baldo E., Pankhurst, R.J., Rapela, C.W., Saavedra, J. y Mazzieri, C. 1998. Granito El Cerro, Magmatismo Colisional Famatiniano en el sector austral de la Sierra Norte Ambargasta, Córdoba. Actas, 10° Congreso Latinoamericano de Geología y 6° Congreso Nacional de Geología Económica 2: 374–378. Buenos Aires.
- Candiani, J.C., Stuart-Smith, P., Gaido, F., Carignano, C., Miró, R. y López, H. 2001. Hoja Geológica 3163-I: Jesús María, Provincia de Córdoba. SEGEMAR, Boletín 314. Buenos Aires.
- Casquet, C., Pankhurst, R.J., Galindo, C., Rapela, C., Fanning, M., Baldo, E.G., Dahlquist, J., González Casado, J. y Colombo, F. 2012. A History of proterozoic terranes in southern south America: From Rodinia to Gondwana. *Geosciences Frontiers* 3: 137–145.
- Caprano, J., Colombo, F., Baldo, E.G. y Wemmer, K. 2012. Basic Magmatism Eastern Sierras Pampeanas (Córdoba, Argentina): the magmatic record of Late Carboniferous extension. 8° Congreso Geológico de España. *Geotemas* 13: 570. Oviedo.
- Castellote, P. 1982. La Formación La Clemira y edad de su metamorfismo (Sierra de Ambargasta, Provincia de Santiago del Estero), Acta Geológica Lilloana, 16 (1): 71–76.
- Castellote, P. 1986. Estudio geológico y geocronológico del basamento de la Sierra Norte de Córdoba. Acta Geológica Lilloana 17.
- Cingolani, C.A. y Varela R. 1975. Geocronología rubidio-estroncio de rocas ígneas y metamórficas de las Sierras Chica y Grande de Córdoba, República Argentina. 2° Congreso Iberoamericano Geología Económica, Actas 1: 9–35. Buenos Aires.
- Coniglio, J., Xavier, R.P., Pinotti, L. y D'Eramo, F. 2000. Ore-forming fluids of vein-type fluorite deposits of the Cerro Áspero batholith, southern Córdoba Province, Argentina. *International Geology Review* 42: 368–363.
- Dahlquist, J.A., Pablo, H.A. y Bello, C. 2013. Devonian F-rich peraluminous A-type magmatism in the proto-Andean foreland (Sierras Pampeanas, Argentina): Geochemical constraints and petrogenesis from the western-central region of the Achala batholith. *Mineral Petrology* DOI 10.1007/s00710-013-0308-0.
- Daziano, C. 1986. El magmatismo básico en el batolito de Achala. Estudio geológico-petroológico de los filones lamprofiricos del flanco oriental y los basaltos olivínicos del borde centro-occidental, Sierra Grande de Córdoba. Tesis doctoral Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba (inédita), 118 p. Córdoba.
- D'Eramo, F., Llambías, E. y Pinotti, L. 1999. Geología, Petrografía y Edad del plutón El Hongo. Sierra Chica de Córdoba. Actas 14° Congreso Geológico. Tomo 1: 93–94.
- D'Eramo, F., Pinotti, L., Tubía, J.M., Vegas, N., Aranguren, A., Tejero, R. y Gómez, D. 2006. Coalescence of lateral spreading magma ascending through dykes: a mechanism to form a granite canopy (El Hongo pluton, Sierras Pampeanas, Argentina). *Journal of the Geological Society* 163: 881–892.
- Drobe, M., López de Luchi, M.G., Steenken, A., Frei, R., Naumann, R., Wemmer, K. y Siegesmund, S. 2011. The geodynamic evolution of the Eastern Sierras Pampeanas. *International Journal of Earth Science (Geology Rundsch)* 100: 631–657.
- Dorais, M., Lira, R., Chen, Y. y Tingey, D. 1997. Origin of biotite-apatite-rich enclaves, Achala Batholith, Argentina. *Contributions to Mineral and Petrology* 130: 31–46.
- Escayola, M., 1994. Faja Ultramáfica de la Sierra Grande de Córdoba entre Inti Yaco y Estancia San Miguel, Provincia de Córdoba, Argentina. Tesis doctoral Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba (inédita) 323 p. Córdoba.
- Escayola M.P., Pimentel, M.M. y Armstrong, R. 2007. Neoproterozoic back arc basin: sensitive high-resolution ion microprobe U–Pb and Sm–Nd isotopic evidence from eastern Pampean ranges, Argentina. *Geology* 35: 495–498.
- Escayola, M.P., van Staal, C.R. y Davis, W.J. 2011. The age and tectonic setting of the Puncoviscana Formation in northwestern Argentina: an accretionary complex related to Early Cambrian closure of the Puncoviscana Ocean and accretion of the Arequipa-Antofalla block. *Journal of South American Earth Sciences* 32: 438–459.
- Fantini, R., Gromet, L., Simpson, C. y Northrup, C. 1998. Timing of high-temperature metamorphism in the Sierras Pampeanas of Córdoba, Argentina: Implications for Laurentia-Gondwana interactions. Actas 10° Congreso Latinoamericano de Geología y 6° Congreso Nacional de Geología Económica Actas 2: 388–392. Buenos Aires.
- Galindo, C., Pankhurst, R.J., Casquet, C., Coniglio, J., Baldo, E., Rapela C.W. y Saavedra J. 1997. Age, Sr and Nd-Isotope Systematics and origin of two Fluorite Lodes, Sierras Pampeanas, Argentina. *International Geology Review* 39: 948–954.
- Galliski, M.A. 1994. La Provincia Pegmatítica Pampeana 2: Metalogénesis de sus distritos económicos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 49: 113–122.
- Galliski, M.A. y Linares, E. 1999. New K-Ar muscovite ages from granitic pegmatites of the Pampean Pegmatite province 2° Simposio Sudamericano de Geología. Expanded Abstracts: 63–67. Córdoba.
- González, R., Castellote, M., Bortolotti, P., Cuenya, M.P., Omil, M., Moyano, E.R. y Ojeda, J. 1985. La actividad eruptiva en las Sierras Pampeanas. Esquemización geográfica y temporal. Acta Geológica Lilloana 16 (2): 288–294.
- González, R.R. y Toselli, A.J. 1974. Radimetric dating of igneous rocks from Sierras Pampeanas, Argentina. *Geociencias* 4 (3): 137–141.
- González, R.R. y Toselli, A.J. 1975. La efusividad del Mesozoico argentino y su relación con áreas sudamericanas. *Annals 25° Congreso Brasileiro Geología* 259–272. San Pablo.
- Gordillo, C.E. y Lencinas, A.N. 1967. Geología y petrología del extremo norte de la sierra de Los Cóndores, Córdoba. *Boletín Academia Nacional Ciencias Córdoba* 66: 73–108.
- Gordillo, C.E. y Linares, E. 1981. Geocronología y petrografía de las volcanitas terciarias del Departamento Pocho, Provincia de Córdoba. *Revista Asociación Geológica Argentina* 36 (4): 380–388.
- Gordillo, C.E., Linares, E. y Daziano, C.O. 1983. Nuevo afloramiento de nefelinita olivínica: Estancia Guasta, sierra de Córdoba. *Revista Asociación Geológica Argentina* 38 (3-4): 485–489.
- Gordillo, D.E., Kirschbaum, A.M. y Baldo, E.G. 1997. Magmatismo del Borde Oriental de las Sierras Pampeanas: los granitoides de la Sierra de Ischilín, Provincia de Córdoba, Argentina. 8° Congreso Geológico Chileno Actas 2: 1290–1294. Antofagasta.
- Gromet, L.P. y Simpson, C. 1999. Age of the Paso del Carmen Pluton and Implications for the duration of the Pampean Orogeny, Sierras de Córdoba, Argentina. Actas 14° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 149–151. Salta.
- Gromet, L.P., Otamendi, J.E., Miró, R.C., Demichelis, A.H., Schwartz, J.J. y Tibaldi, A.M. 2005. The Pampean orogeny: Ridge subduction or continental collision (abstract). En *Gondwana 12: Geological and Biological Heritage of Gondwana*, R.J. Pankhurst y G.D. Veiga (eds.),

- Academia Nacional de Ciencias: 85–186. Córdoba,
- Iannizzotto, N.F., Rapela, C.W., Baldo, E.G., Galindo, C. y Fanning, C.M. 2013. The Sierra Norte–Ambargasta Batholith: Cambrian magmatism formed in a transpressional belt along the western edge of the Río de la Plata cratón? *Journal of South American Earth Sciences* 42: 127–142.
- Kay, S.M. y Gordillo, C.E. 1994. Pocho volcanic rocks and the melting of depleted continental lithosphere above a shallowly dipping subduction zone in the central Andes. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 117: 25–44.
- Kirschbaum, A.M., Pérez, M.B., Baldo, E.G. y Gordillo, D.E. 1997. Magmatismo Oriental de las Sierras Pampeanas de Córdoba, Argentina: Petrografía y Geoquímica de los Granitoides de a Sierra de Macha. 8° Congreso Geológico Chileno, Actas, 2: 1319–1323. Antofagasta.
- Koukharsky, M., Munizaga, F., Leal, P., Correa, M. y Brodtkorb, M. 1999. New K/Ar ages in the Ambargasta and Norte de Córdoba ranges, Argentina. 2° South American Symposium on Isotope Geology, Actas: 14–16. Carlos Paz.
- Koukharsky, M., Brodtkorb, M.K., de Kay, S.M. y Munizaga, F. 2003. La Formación Balbuena, integrante del arco magmático pampeano en la sierra de Ambargasta, Provincia de Santiago del Estero. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 58: 583–592.
- Lagorio, S.L. 2008. Early Cretaceous alkaline volcanism of the Sierra Chica de Córdoba (Argentina): Mineralogy, geochemistry and petrogenesis. *Journal of South American Earth Sciences* 26(2): 152–171.
- Leal, P.R., Hartmann, L.A., Santos, J.O., Miró, R. y Ramos, V.A. 2003. Volcanismo post-orogénico 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.
- Linares, E. 1966. Datación geológica de las rocas graníticas de las Sierra de Córdoba por medio del método plomo-alfa (Larsen). Actas 3° Jornadas Geológicas Argentinas, Actas 2: 199–206. Comodoro Rivadavia.
- Linares, E. y Latorre C.O. 1969. Edades potasio-argón y plomo-alfa de rocas graníticas de las Provincia de Córdoba y de San Luis. 6° Jornadas Geológicas Argentinas, Actas 2: 195–204. Mendoza.
- Linares, E. y Cordani, U. 1976. Edades potasio-argón de anfíbolitas de la Provincia de Córdoba, República Argentina. 6° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 501–509. Bahía Blanca.
- Linares, E. y González, R. 1990. Catálogo de edades radiométricas de la República Argentina. Parte I. Asociación Geológica Argentina, Serie F versión en CD.
- Linares, E. y Valencio, D. 1974. Edades potasio-argón y paleomagnetismo de los diques traquibasálticos del río Los Molinos, Córdoba. *Revista Asociación Geológica Argentina* 29(3): 341–348.
- Linares, E. y Valencio, D. 1975. Palaeomagnetism and K-Ar ages of some trachybasaltic dykes from Río Los Molinos, Province of Córdoba, Republic of Argentina. *Journal Geophysical Research* 80(23): 3315–3321.
- Lira, R. y Kirschbaum, A. 1990. Geochemical evolution of granites from the Achala Batholith of the Sierras Pampeanas, Argentina. En Kay S.M. y Rapela C.W. (eds.): *Plutonism from Antarctica to Alaska: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Special Paper* 241: 67–76.
- Lira, R., Millone, H.A., Kirschbaum, A.M. y Moreno, R.S. 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.A., Varela R. y Prozzi, C. 2003. Ig-nimbritas 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.
- Lucassen, F., Escayola, M., Franz, G., Romer, R.L. y Koch, K. 2002. Isotopic composition of Late Mesozoic basic and ultrabasic rocks from the Andes (23–32°S)–implications for the Andean mantle. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 143: 336–349.
- Lucero Michaut, H.N. 1979. Sierras Pampeanas del norte de Córdoba, sur de Santiago del Estero, borde oriental de Catamarca y ángulo sudeste de Tucumán. 2° Simposio de Geología Regional Argentina 1: 293–348. Córdoba.
- Lyons, P., Skirrow, R. y Stuart-Smith, P. 1997. Informe geológico y metalogénico de las Sierras Septentrionales de Córdoba (Provincia de Córdoba). 1:250.000. Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR. Anales 27. Buenos Aires.
- Marinesco, N. 1956. Edad de la Tierra Según Cronología Radio-activa de la sierra de Comechingones (Cerro Champaquí - Córdoba). *Revista de la F.C.E.F. y N.* Año 28, N° 1-2: 1–26.
- Martino, R.D. 2003. Las fajas de deformación dúctil de las Sierras Pampeanas de Córdoba: una reseña general. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 58: 549–571.
- Martino, R.D., Pinceyra, R., Guerreschi, A. y Sfragulla, J. 1999. La faja de deformación Sauce Punco, Sierra Norte, Córdoba, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 53(4): 436–440.
- Martino, R.D., Steenken, A., Wemmer, K., Siegesmund, S. y López de Luchi, M.G. 2005. Age constraints on the tectonic activity of the Guacha Corral shear belt, Sierra de Comechingones, Córdoba. En Pankhurst, R.J. y Veiga, G.D. (eds.): *Gondwana 12: Geological and Biological Heritage of Gondwana. Academia Nacional de Ciencias, Córdoba, Argentina, Abstracts*: 248.
- Martino, R.D., Guerreschi, A., Wemmer, K., López de Luchi, M.G., Steenken, A. y Siegesmund, S. 2006. Cooling ages constraints on the tectonic activity of the Los Túneles shear belt, Eastern Pampean ranges of Córdoba, Argentina. 5° South American Symposium on Isotope Geology Actas 1: 119–122.
- Massabié, A.C. 1982. Geología de los alrededores de Capilla del Monte y San Marcos, Provincia de Córdoba. *Revista Asociación Geológica Argentina* 37(2): 153–173.
- Massabié, 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(1): 80–84.
- Millone, H.A., Tassinari, C.G., Lira, R. y Poklepovic, M.F. 2003. Age and strontium-neodymium isotope geochemistry of granitoids of the Sierra Norte-Ambargasta batholith, central Argentina. 4° South American Symposium on Isotope Geology, Actas 2: 617–620. Salvador.
- Miró, R. y Gromet, L.P. (2005) The Famatinian orogeny in the Sierras de Córdoba, Argentina: new tectonic insights. 16° Congreso Geológico Argentino, Actas 4: 681–688.
- Morteani G., Preinfalk C., Spiegel, W. y Bonalumi A. 1995. The Achala Granitic Complex and the Pegmatites of the Sierras Pampeanas (Northwest Argentina): A study of Differentiation. *Economic Geology* 90: 636–647.
- Murra, J. y Baldo, E.G. 1996. El granito de Capilla del Monte y su encajonante ígneo-metamórfico, Sierras de Pampeanas de Córdoba, Argentina. 13° Congreso Geológico Argentino, Acta 3: 499–505. Buenos Aires.
- Northrup, C.J., Simpson, C. y Hodges, K.V. 1998. Pseudotachylite in fault zones of the Sierras de Córdoba, Argentina: petrogenesis and Ar/Ar geochronology. *Geological Society of America. Abstracts with Programs* 30: 325.
- Olsacher, J. 1960. Descripción geológica de la hoja 20h, Los Gigantes, Provincia de Córdoba. Dirección Nacional de Geología y Minería,



- Boletín 90. Buenos Aires.
- Otamendi J.E., Castellarini, P., Fagiano, M., Demichelis, A. y Tibaldi, A. 2004. Cambrian to Devonian Geologic Evolution of the Sierra de Comechingones, Eastern Sierras Pampeanas, Argentina: Evidence for the Development and Exhumation of Continental Crust on the Proto-Pacific Margin of Gondwana. *Gondwana Research* 7(4): 114–1155.
- Pankhurst, R.J., Rapela, C.W. y Fanning, C.M. 2000. Age and origin of coeval TTG, I- and S-type granites in the Famatinian belt of NW Argentina. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Science* 91: 151–168.
- Pérez, M.B., Rapela, C.W. y Baldo, E.G. 1996. Geología de los Granitoides del sector septentrional de la Sierra Chica de Córdoba. 13° Congreso Geológico Argentino, Acta 5: 493–506. Buenos Aires.
- Pinotti, L., Coniglio, J., Esparza, A., D'Eramo, F. y Llambías, E. 2002. Nearly circular plutons emplaced by stopping at shallow crustal levels, Cerro Áspero batholith, Sierras Pampeanas de Córdoba, Argentina. *Journal of South American Earth Science* 15: 251–265.
- Ramos, V.A. 1979. Rocas básicas y gneises asociados en la comarca de Río Grande, Departamento Calamuchita, Provincia de Córdoba. *Boletín Academia Nacional Ciencias Córdoba* 53: 143–165.
- Rapela, C.W., Pankhurst, R.J., Kirschbaum, A. y Baldo, E.G. 1991. Intrusivos de edad carbónica en el Batolito de Achala. Evidencias de una anatexis regional en las Sierras Pampeanas? 6° Congreso Geológico Chileno, Actas: 40–43. Viña del Mar.
- Rapela, C.W., Pankhurst, R. y Bonalumi, A. 1991. Edad y geoquímica del pórfido granítico de Oncán, Sierra Norte de Córdoba, Sierras Pampeanas, Argentina. 6° Congreso Geología Chileno 19–22. Viña del Mar.
- Rapela C.W., Pankhurst R.J., Casquet C., Baldo E., Saavedra J., Galindo C. y Fanning C.M. 1998. The Pampean Orogeny of the south proto-Andes: evidence for Cambrian continental collision in the Sierras de Córdoba. En Pankhurst R.J. y Rapela C.W. (eds.). *The proto-Andean Margin of Gondwana*. Special Publication Geological Society of London 142: 181–217.
- Rapela C.W., Baldo E.G., Pankhurst R.J., Saavedra J. 2002. Cordierite and Leucogranite Formation during Emplacement of Highly Peraluminous Magma: the El Pilón Granite Complex (Sierras Pampeanas, Argentina). *Journal of Petrology* 43(6): 1003–1028.
- Rapela, C.W., Pankhurst, R.J., Casquet, C., Fanning, C.M., Baldo, E.G., González-Casado, J.M., Galindo, C. y Dahlquist, J. 2007. The Río de la Plata craton and the assembly of SW Gondwana. *Earth Science Review* 83(1-2): 49–82.
- Rapela C.W., Baldo E.G., Pankhurst, R.J. y Fanning C.M. 2008. The Devonian Achala Batholith of the Sierras Pampeanas: F-Rich Aluminous A-Types Granites. 6° South American Symposium on Isotope Geology. CDrom, Extended Abstract 53: 4p. Bariloche.
- Russo, A., Ferello, R. y Chebli, G. 1979. Llanura Chaco-Pampeana. En Turner, J.C.M. (ed): 2° Simposio de Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias de Córdoba. 1: 139–184.
- Saavedra J., Baldo E.G., Pankhurst, R., Rapela, C. y Murra, J. 1998. El Granito de Capilla del Monte (Sierras Pampeanas de Córdoba, Argentina): Edad, Geoquímica, Génesis y Especialización Metalogénica. 10° Congreso Latinoamericano de Geología y 6° Congreso Nacional de Geología Económica, Actas 2: 372. Buenos Aires.
- Sánchez, M.L. y Bermúdez A. 1997. Caracterización geoquímica del volcanismo cretácico de la Sierra de Los Cóndores, Córdoba, Argentina. 8° Congreso Geológico Chileno, Actas 2: 1522–1527. Antofagasta.
- Santacruz, J.N. 1980. Edades K-Ar de rocas del área de las cuencas de los ríos Quinto y Conlara, Provincia de San Luis. *Revista Asociación Geológica Argentina* 35(3): 434–435.
- Santamaría, G.R. 1972. Estudio de la pegmatita Las Tapias, sector portador de espodumeno (Labor Arce), Provincia de Córdoba. Trabajo Final de Licenciatura Facultad Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires (inédito). Buenos Aires.
- Schwartz, J.J. y Gromet, L.P. 2004. Provenance of Late Proterozoic-early Cambrian basin, Sierras de Córdoba, Argentina. *Precambrian Research* 129: 1–21.
- Schwartz, J.J., Gromet, L.P. y Miró, R. 2008. Timing and Duration of the Calc-Alkaline Arc of the Pampean Orogeny: Implications for the Late Neoproterozoic to Cambrian Evolution of Western Gondwana. *Journal of Geology* 116: 39–61.
- Sfragulla, J.A. 2013. Plutonismo de las Sierras de Altautina y Quebrada del Tigre, Sierras Pampeanas Orientales, Argentina. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Salta (inédita), 308 p. Salta.
- Siegesmund, S., Steenken, A., Martino, R., Wemmer, K., López de Luchi, M.G., Frei, R., Presnyakow, S. y Guerschi, A. 2010. Time constraints on the tectonic Evolution of the Eastern Sierras Pampeanas (Central Argentina). *International Journal Earth Sciences* 99: 1199–1226.
- Sims J.P., Ireland, T.R., Camacho, A., Lyons, P., Pieters, P.E., Skirrow, R.G., Stuart-Smith P.G. y Miró, R. 1998. U–Pb, Th–Pb and Ar–Ar geochronology from the southern Sierras Pampeanas: implication for the Palaeozoic tectonic evolution of the western Gondwana margin. En Pankhurst, R.J., Rapela, C.W. (eds.). *The Proto-Andean Margin of Gondwana*. Special Publication Geological Society of London 142: 259–281.
- Simpson, C., Law, R.D., Gromet, L.P., Miró, R. y Northrup, C.J. 2003. Paleozoic deformation in the Sierras de Córdoba and Sierra de Las Minas, eastern Sierras Pampeanas, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 15: 749–764.
- Söllner, F., Brodtkorb, M., Miller, H., Pezzutti, N. y Fernández, R. 2000. U–Pb zircon ages of metavolcanic rocks from the Sierra de San Luis, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 55(1-2): 15–22.
- Steenken A., Wemmer, K., Martino, R.D., López de Luchi, M.G., Guerschi, A. y Siegesmund, S. 2010. Post-Pampean cooling and the exhumation of the Sierras Pampeanas in the West of Córdoba. (Central Argentina). *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie* 256: 235–255.
- Stipanovic, P.N. y Linares, E. 1975. Catálogo de edades radiométricas determinadas para la República Argentina. Tomo 1: Años 1960-1974. Publicación Especial Asociación Geológica Argentina. Serie B, N° 3. Buenos Aires.
- Stuart-Smith, P.G., 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 Ramos, V.A. y Keppie, J.D. (eds.): *Laurentia-Gondwana Connections before Pangea*. Geological Society of America, Special Papers 336: 87–114.
- Tibaldi, A.M., Otamendi J.E., Gromet, L.P. y Demichelis, A.H. 2008. Suya Taco and Sol de Mayo mafic complexes from eastern Sierras Pampeanas, Argentina: Evidence for the emplacement of primitive OIB-like magmas into deep crustal levels at a late stage of the Pampean orogeny. *Journal of South American Earth Sciences* 26: 172–187.
- Villar, L.M. 1985. Las fajas ultrabásicas de Argentina. Tipo de ultramáficos y metalogénica. 4° Congreso Geológico Chileno Acta 4: 610–633. Antofagasta.
- Viramonte, J., Derruelle, B., Moorbath, S., Mazzuoli, R. y Omarini, R. 1994. El Volcanismo Alcalino de Chaján -Las Chacras- Córdoba-San Luis, Argentina. 7° Congreso Geológico Chileno. Acta 2: 1273–1277. Concepción.
- von Gosen, W., Prozzi, C. 2010. Pampean deformation in the Sierra Norte de Córdoba, Argentina: implications for the collisional history at the western pre-Andean Gondwana margin. *Tectonics* 29: 1–33.



Whitmeyer S.J. 2008. Dating fault fabrics using modern techniques of  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  thermochronology: evidence for Paleozoic deformation in the Eastern Sierras Pampeanas, Argentina. *Journal of the Virtual Explorer* 31(5): 1–14.

Whitmeyer, S.J. y Simpson, C. 2004. Regional de formation of the Sierra de San Luis, Argentina: Implications for the Paleozoic development of western Gondwana. *Tectonics* 23: TC1005, DOI 10.1029/2003TC001542.