

Edad de cristalización magmática a partir de circones ígneos con un rango elevado de edades U-Pb concordantes: Dos ejemplos de la Sierra de Fiambalá (Sierras Pampeanas, Argentina).

Age of magma crystallization from igneous zircon showing a large range of concordant U-Pb ages: Two examples from the Sierra de Fiambalá (Sierras Pampeanas, Argentina).

C. Casquet¹, P. Castiñeiras¹, P.H. Alasino^{2,3}, J.A. Dahlquist⁴ y E.g. Baldo⁴

1 Dpto. Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense 28040 Madrid. casquet@ucm.es, castigar@ucm.es

2 Centro Regional de Investigaciones Científicas y Transferencia Tecnológica de La Rioja (CRILAR), Prov. de La Rioja-UNLaR-SEGEMAR-UNCa-CONICET, Entre Ríos y Mendoza, 5301, Anillaco, La Rioja, Argentina. phalasio@gmail.com

3 Instituto de Geología y Recursos Naturales (INGeReN), CENIIT-UNLaR, Av. Gobernador Vernet y Apóstol Felipe, 5300, La Rioja, Argentina.

4 Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (CICTERRA). CONICET-UNC. Av. Vélez Sarsfield 1611. Ciudad Universitaria X5016GCA, Argentina. juan.andres.dahlquist@unc.edu.ar, edgardo.baldo@unc.edu.ar

Resumen: Se han analizado elementos traza en circon de dos muestras de rocas ígneas de la Sierra de Fiambalá, en las Sierras Pampeanas, al NO de Argentina. En ambas muestras, una gabronorita y una granodiorita, las edades obtenidas previamente mediante SHRIMP no arrojaron resultados concluyentes, ya que la dispersión de edades concordantes varía entre 20 y 80 millones de años. Usando la composición de tierras raras del circon, que es bastante homogénea en las dos muestras, podemos justificar que la variabilidad observada en las edades no se debe probablemente a un período de cristalización magmática largo, sino que está causada por una pérdida de plomo. De esa manera, la edad de esas rocas debería de obtenerse a partir del conjunto de las edades más antiguas del rango concordante.

Palabras clave: Sierra de Fiambalá, Sierras Pampeanas, composición de circon, geocronología.

Abstract: We have analyzed trace elements in zircon from two igneous samples collected in Sierra de Fiambalá, at Sierras Pampeanas, in NW Argentina. In both samples, a gabbronorite and a granodiorite, the obtained ages using SHRIMP did not yielded a conclusive result, as the concordant ages smeared between 20 and 80 m.y. Using zircon rare earth element composition, which is quite homogeneous in both samples, we can argue that the observed age variability is not caused by a large range of magmatic crystallization ages, but it is the result of lead loss. Accordingly, the age of these rocks should be calculated from the oldest set of concordant ages.

Keywords: Sierra de Fiambalá, Sierras Pampeanas, zircon composition, geochronology

INTRODUCCIÓN

Un problema frecuente al datar rocas ígneas o rocas metamórficas de alto grado mediante técnicas que permiten el análisis puntual es la gran dispersión que se observa en los datos. Esto es debido a que la incertidumbre asociada a cada análisis individual no permite la evaluación de datos ligeramente discordantes. Asumiendo que no se trata de un problema analítico, existen varias interpretaciones para explicar esta dispersión: i) que ese intervalo represente un proceso geológico real (*e.g.*, Coleman *et al.*, 2004); ii) que la edad real sea la más joven y las edades antiguas representen herencias (*e.g.*, Sambridge y Compston, 1994) y, iii) que la edad real sea la más antigua y las edades jóvenes representen pérdida de plomo (*e.g.*, Castiñeiras *et al.*, 2010). Para poder obtener una edad de cristalización en estos casos, es necesario recurrir a información adicional,

como el sistema isotópico Lu-Hf (Gerdes y Zeh, 2009) o la geoquímica del circon (Castiñeiras *et al.*, 2010).

En este trabajo vamos a utilizar la geoquímica del circon de dos muestras de rocas ígneas de composición contrastada, que se ubican dentro de la misma región geológica, la Sierra de Fiambalá, en las Sierras Pampeanas al NO de Argentina (deBari, 1994). Ambas muestras fueron datadas previamente mediante SHRIMP y las edades con una discordancia menor del 10% presentan una dispersión entre 20 y 80 millones de años. Otros autores (ver Weinberg *et al.*, 2018, y referencias citadas él) han encontrado rangos de edades similares dentro del ciclo orogénico Famatiniano que interpretan como resultado de un proceso geológico continuo. Sin embargo, nuestros resultados apuntan a otra interpretación.

CONTEXTO GEOLÓGICO

Se han seleccionado dos muestras de las que se dispone de edades U-Pb SHRIMP de circón y de análisis de tierras raras (REE) y otros elementos traza, efectuadas mediante LA-ICP-MS en los propios granos datados previamente. Ambos métodos analíticos pertenecen al Centro de Instrumentación Científica de la Universidad de Granada. Las muestras y sus coordenadas son: una gabronorita (FIA-40001; 27°55'3.7"S/67°27'31.9"O) y una granodiorita (FIA-40012; 27°17'13.8"S/67°26'59.7" O). Ambas se localizan en la Sierra de Fiambalá, una de las Sierras Pampeanas noroccidentales que enlazan estas con el altiplano de La Puna al norte. Se trata de una extensa región de difícil acceso con diferencias de altitud entre 1000 y 4000 m.

La gabronorita pertenece al Fiambalá Gabbroic Intrusion (deBari, 1994) consistente en un complejo estratificado de unos 30 km², formado por un acumulado basal (dunita, websterita) de unos 200-500 m, seguido de casi 2500 m de gabros con dos piroxenos y de gabros hornbléndicos, débilmente bandeados. El magma parental fue toleítico, rico en Mg e hidratado, con más del 11% de MgO (deBari, 1994). Grissom *et al.* (1998) aportan una edad U-Pb de cristalización de 510-515 Ma. La muestra escogida es una gabronorita de la parte más alta del complejo. De su peculiar composición química, destacamos los contenidos de SiO₂ = 47.87%; Al₂O₃ = 19.75%; MgO = 5.8%; CaO = 11.16%, siendo además bajos los contenidos de elementos como el Cr (22 ppm) y el Ni (20 ppm). Las REE suman 60 ppm y el contenido de Zr es relativamente elevado (70 ppm), lo que se refleja en la presencia de circón. Petrográficamente, se trata de una gabronorita formada por un mosaico de plagioclasa granoblástica (An₉₀₋₁₀₀), Opx, Cpx y Hbl, con opacos, apatito y circón accesorios. Es también reseñable la presencia de monacita (Grissom *et al.*, 1998), que posiblemente juegue un importante papel en la composición del circón. Además, se pueden encontrar minerales de alteración, localizados junto a fracturas, como anfíbol verde fibroso, opacos, albíta y clorita.

La granodiorita del Tatón es un cuerpo grande, de forma y extensión desconocidas, encajado en gneises migmatíticos en la parte norte de la Sierra de Fiambalá. En campo es un granitoide biotítico de grano grueso y estructuralmente isotropo, aunque recorrido por pequeñas fajas de cizalla dúctil y con xenolitos micáceos. De su composición química destacamos el SiO₂ = 64.81%; MgO = 2.46% y el K₂O = 4.96%. El contenido total en REE es de 295 ppm y el Zr = 302 ppm. Su composición mineral es: Qtz, Pl, Bt, Kfs, Ep, Zr, Spn, Rt (sagenita en Bt), Ap, Ser (alterando a Pl), Ms (?). La plagioclasa (An₁₅₋₂₀) contiene abundantes inclusiones, por lo general desorientadas, de prismas de clinozoisita. Las placas de biotita están kinkadas y/o dobladas con abundante titanita localizada en regiones más deformadas dentro y en el borde de los cristales. La biotita localmente parece recristalizada. Se reconocen también microenclaves ricos en Bt. El cuarzo también muestra recristalización granoblástica poligonal localizada. El Kfs es micropertita y puede estar microclinizada. Hay mirmequitas. La roca sufrió una deformación débil y recristalización a alta T.

En ambos casos, la caja de los plutones la forman rocas metasedimentarias de edad todavía imprecisa y con un grado de metamorfismo variable, entre facies esquistos verdes y anfibolitas (Grissom *et al.*, 1998). Rapela *et al.* (2016) encuentran en la parte occidental de Fiambalá gneises migmatíticos con circones detríticos no más jóvenes de 900 Ma que interpretan como parte de una serie metasedimentaria Neoproterozoica, que incluye también mármoles y rocas de silicatos cálcicos, y que es de procedencia Lauréntica (Serie de Ancajón). Asimismo, Grissom *et al.* (1998) datan mediante U-Pb en circones un ortogneis ubicado en dicha serie, obteniendo una edad de 550-540 Ma. En cuanto al metamorfismo regional, lo ubican entre 515 y 470 Ma basándose en edades U-Pb de monacita procedente de los gneises migmatíticos y sus leucosomas.

GEOCRONOLOGÍA

Gabronorita de Fiambalá FIA-40001

Se obtuvieron varios granos de circón de formas irregulares debidas a resorción. No muestran zonado o bien tienen un típico zonado en sectores o paralelo u oscilatorio en unos pocos granos. Se obtuvieron edades U-Pb en 50 puntos. Los contenidos de Th y U son variables en los rangos 9.4 a 82.5 ppm y 31.5 a 160 ppm, respectivamente. Veinticuatro análisis puntuales muestran discordancia >10% (respecto a la concordia). Los análisis concordantes (disc. < 10%) arrojan edades (²⁰⁶Pb/²³⁸U) continuas entre c. 460 Ma y 538 Ma, la mayoría concentradas entre 475 y 515 Ma (Th/U entre 0.1 y 1.17). Con los análisis concordantes se obtienen dos edades Concordia: 481.7 ± 3.7 Ma (MSWD = 0.039; prob. de concord. = 0.84; edades entre 470 and 495 Ma) y 506.5 ± 5.1 Ma (MSWD = 0.37; prob. de concord. = 0.54; edades entre 495 y 520 Ma).

Granodiorita El Tatón FIA-40012

Se separaron abundantes granos euhedrales prismáticos con zonado oscilatorio. El rango de edades obtenido en los 24 puntos analizados varía entre 504 y 1850 Ma. El grupo principal (n=20) va de 504 a 528 Ma (Th/U = 0.27-0.54). Son granos ígneos próximos a la concordia, el resto son xenocristales. Una vez eliminados del grupo principal los que contienen más Pb común (>0.1%) que dan mayor discordancia, queda un continuo de edades entre 504 ± 6 Ma y 528 ± 3 Ma.

RESULTADOS

Se analizaron elementos traza en 16 circones concordantes previamente datados mediante SHRIMP, pertenecientes a las muestras FIA-40001 (9 análisis, ver Tabla I) y FIA-40012 (7 análisis, ver Tabla I). En un diagrama de tierras raras normalizado al condrito (Fig. 1) se puede distinguir que los circones en ambas rocas tienen firmas geoquímicas características. Por un lado, la muestra FIA-40012 presenta un mayor contenido en REE, una marcada anomalía negativa de Eu y una ligera anomalía positiva de Ce. Por otro lado, en la muestra FIA-40001 tanto el fracciona-

miento como la anomalía de Ce son mucho más pronunciados, aunque no se aprecia una anomalía de Eu.

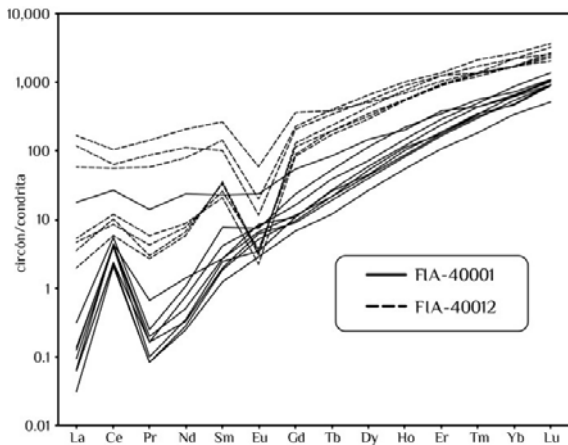


FIGURA 1. Diagrama de tierras raras normalizado al condrito para los circones de las muestras FIA-40001 (gabronorita) y FIA-40012 (granodiorita) donde resultan evidentes sus características composicionales. Explicación en el texto.

Hemos calculado la temperatura a partir del contenido en titanio del circón mediante el termómetro desarrollado por Watson y Harrison (2005), asumiendo una actividad de 0.7 tanto para el titanio como para la sílice. Aunque la temperatura absoluta que se obtiene con este método puede ser discutible, la variabilidad que se observa entre los diferentes análisis de la misma muestra se puede usar para monitorizar procesos petrogenéticos (ver Castiñeiras *et al.*, 2011, y referencias citadas en él).

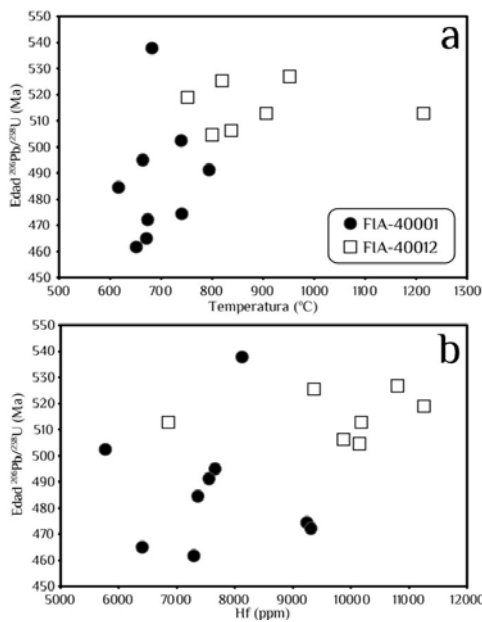


FIGURA 2. Diagramas de la edad del circón obtenida mediante SHRIMP frente a la temperatura calculada a partir del termómetro de Ti en circón (a) y al hafnio (b). Explicación en el texto.

Proyectando la temperatura así calculada frente a la edad obtenida mediante SHRIMP (Fig. 2a), no existe una clara

correlación entre ambos parámetros dentro de cada muestra. Para revelar posibles procesos de evolución magmática también se ha usado el hafnio (Fig. 2b). Proyectándolo frente a la edad, se observa que es complicado establecer una clara correlación. En este sentido, es muy significativa el agrupamiento que se aprecia en la muestra FIA-40012, cuyas implicaciones se discutirán más adelante.

Si proyectamos la anomalía de europio (Eu/Eu*) frente a la edad (Fig. 3) observamos una marcada anomalía en la muestra FIA-40012, que no define ninguna tendencia. En el caso de la muestra FIA-40001, los datos están más dispersos, pero tampoco existe una correlación entre ambos parámetros.

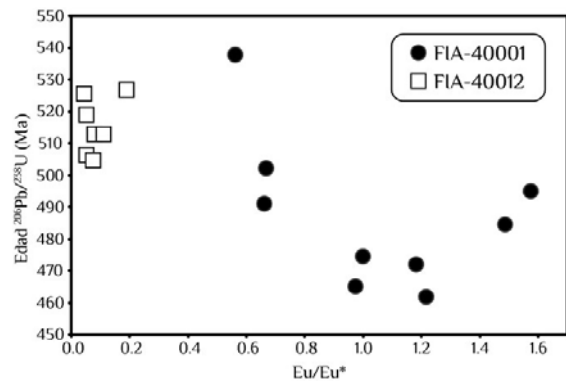


FIGURA 3. Diagrama de la anomalía de europio frente a la edad obtenida mediante SHRIMP.

INTERPRETACIÓN

Los datos composicionales de tierras raras en circón resultan de gran utilidad al interpretar el significado de la dispersión de edades en ambas muestras. En el caso de la gabronorita (muestra FIA-40001), las pautas de REE de la Fig. 1 son bastante homogéneas. Además, en los diagramas en los que se enfrenta la edad a algún parámetro composicional, no se observan tendencias claras. Este comportamiento sugiere que la dispersión de edades no puede ser debida a un proceso de evolución magmática, como interpretan Weinberg *et al.* (2018). La variabilidad composicional del circón en esta muestra puede explicarse puntualmente como resultado de una herencia (para el análisis de 538 Ma), pero para la anomalía de europio, puede ser el resultado combinado de variaciones en el grado de oxidación y/o de la influencia de la monacita (descrita en estas rocas por Grissom *et al.*, 1998) en el contenido de tierras raras ligeras (LREE).

Para la granodiorita (muestra FIA-40012), la aparente variabilidad del contenido en LREE (Fig. 1) podría deberse que la alteración post-magmática ha facilitado la entrada de estos elementos en la estructura del circón. Sin embargo, es muy llamativo el agrupamiento de los datos de la anomalía de europio en esta muestra, que sugiere que los circones no han registrado un proceso de cristalización fraccionada.

Teniendo en cuenta tanto la ausencia de correlaciones elementales claras y la homogeneidad composicional, lo más razonable sería interpretar la dispersión de las edades como

un proceso de pérdida de plomo. De esa manera, la edad de cristalización de estas rocas ha de obtenerse del conjunto de datos más antiguos (ver Castiñeiras *et al.*, 2010). Así, la edad de la gabronorita (FIA-40001) estaría en torno a los 500 Ma, mientras que la edad de la granodiorita (FIA-40012) sería de alrededor de 520 Ma.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es una contribución del proyecto CGL2016-76439-P del MINECO (España) y de los proyectos CONICET PIP0229, FONCYT PICT 0472 (Argentina). Los autores queremos dedicar este trabajo a la memoria de la Dra. Carmen Galindo.

REFERENCIAS

Castiñeiras, P., Díaz García, F. y Gómez Barreiro, J. (2010): REE-assisted U–Pb zircon age (SHRIMP) of an anatectic granodiorite: Constraints on the evolution of the A Silva granodiorite, Iberian allochthonous complexes. *Lithos*, 116: 153-166.

Castiñeiras, P., Navidad, M., Casas, J.M., Liesa, M. y Carreras, J. (2011): Petrogenesis of Ordovician magmatism in the Pyrenees (Albera and Canigó massifs) determined on the basis of zircon minor and trace element composition. *Journal of Geology*, 119: 521-534.

Coleman, D.S., Gray, W. y Glazner, A.F. (2004): Rethinking the emplacement and evolution of zoned plutons: Geochronologic evidence for incremental assembly of the Tuolumne Intrusive Suite, California. *Geology*, 32: 433-436.

deBari, S.M. (1994): Petrogenesis of the Fiambalá Gabbroic Intrusion, northwestern Argentina, a deep crustal

syntectonic pluton in a continental magmatic arc. *Journal of Petrology*, 35: 679-713.

Gerdes, A. y Zeh, A. (2009): Zircon formation versus zircon alteration — new insights from combined U–Pb and Lu–Hf in-situ LA-ICP-MS analyses, and consequences for the interpretation of Archean zircon from the Central Zone of the Limpopo Belt. *Chemical Geology*, 261: 230-243.

Grissom, G.C., deBari, S.M. y Snee, L.W. (1998): Geology of the Sierra de Fiambalá, northwestern Argentina: implications for Early Palaeozoic Andean tectonics. En: *The proto-Andean margin of Gondwana* (R.J. Pankhurst y C.W. Rapela, eds.). Geological Society, London, Special Publications, 142: 297-323.

Rapela, C.W., Verdecchia, S.O., Casquet, C., Pankhurst, R.J., Baldo, E.g., Galindo, C., Murra, J.A., Dahlquist, J.A. y Fanning, C.M. (2016): Identifying Laurentian and SW Gondwana sources in the Neoproterozoic to Early Paleozoic metasedimentary rocks of the Sierras Pampeanas: Paleogeographic and tectonic implications. *Gondwana Research*, 32: 193-212.

Sambridge, M.S. y Compston, W. (1994): Mixture modeling of multi-component data sets with application to ion-probe zircon ages. *Earth and Planetary Science Letters*, 128: 373-390.

Watson, E.B., y Harrison, T.M. (2005): Zircon thermometer reveals minimum melting conditions on earliest Earth. *Science*, 308: 841-844.

Weinberg, R.F., Becchio, R., Farias, P., Suzaño, N. y Sola, A. (2018): Early Paleozoic accretionary orogenies in NW Argentina: Growth of West Gondwana. *Earth-Science Reviews*, 187: 219-247.

Punto	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Edad
40001																
10.1	5.68	22.14	1.69	14.34	4.53	1.78	14.56	4.09	48.77	15.33	83.01	14.38	137.42	30.10	5766	502.3
3.1	0.01	1.70	0.01	0.17	0.37	0.39	2.57	1.05	14.61	6.64	37.76	11.03	140.93	33.38	7297	461.8
6.1	0.02	1.86	0.01	0.15	0.25	0.22	1.79	0.59	8.67	4.06	23.33	5.92	75.41	17.01	9237	474.5
6.2	0.02	1.95	0.02	0.20	0.39	0.47	2.37	0.92	13.03	6.06	36.09	9.78	121.01	29.70	7371	484.6
7.1	0.03	3.30	0.02	0.46	0.83	0.61	4.38	1.93	23.44	10.92	61.85	16.07	191.79	45.48	6406	465.0
40001b																
14.1	0.10	4.46	0.03	0.65	1.53	0.57	6.19	2.59	37.62	16.59	76.20	18.38	158.44	36.13	8127	537.7
27.1	0.04	3.47	0.02	0.31	0.54	0.50	3.06	1.06	17.33	8.30	38.43	10.44	106.97	30.46	9313	472.0
6.1	0.04	3.24	0.01	0.21	0.49	0.26	2.90	1.26	15.03	7.68	40.16	11.53	103.81	29.34	7561	491.0
7.1	0.021	3.58	0.08	0.85	0.54	0.65	2.91	1.31	20	8.93	51.65	14.2	142.56	35.03	7660	494.9
40012																
10.1	53.46	86.80	17.02	125.82	52.68	4.47	97.27	19.05	166.44	51.93	225.98	44.50	377.20	80.40	10809	526.7
12.1	1.48	7.01	0.51	4.75	5.22	0.28	24.18	9.68	106.44	42.69	203.49	44.18	378.90	87.90	10157	504.5
14.1	38.20	52.37	10.64	67.66	20.30	0.88	54.40	16.94	178.43	67.37	272.15	44.53	484.42	85.17	6863	512.8
22.1	1.67	9.89	0.71	5.37	4.22	0.17	22.38	8.40	97.26	41.46	192.03	43.31	368.38	75.27	11268	518.8
23.1	18.49	46.72	6.94	48.47	28.46	1.51	60.33	19.73	217.79	75.49	296.54	70.47	588.05	119.86	10184	512.8
6.1	1.12	8.22	0.36	4.08	6.70	0.23	34.93	11.54	143.73	57.97	268.16	56.58	487.59	106.38	9372	525.5
9.1	0.63	4.72	0.32	3.53	6.94	0.25	30.76	9.72	115.53	42.51	196.53	39.56	372.17	66.96	9871	506.1

TABLA I. Datos de tierras raras (REE), hafnio (ppm) y edad SHRIMP (Ma) para los circones analizados en las muestras FIA-40001 y FIA-40012.