



Valor y significado geológico de las edades promedio e individuales en geocronología de U-Th-Pb en circón.

Juan Díaz-Alvarado*

Departamento de Geología, Universidad de Atacama, Copayapú 485, Copiapó, Chile

email: juan.diaza@uda.cl

Resumen. Las edades promedio e individuales obtenidas mediante geocronología de U-Th-Pb en circón se emplean indistintamente para datar rocas y procesos geológicos. La consideración de las edades promedio o individuales debe ser valorada en función de los parámetros analíticos y las correcciones usadas para que los datos sean concordantes, así como las características morfológicas y composicionales de los circones o zonas del circón analizadas.

El significado geológico de estas edades depende del tipo de roca y proceso que se pretende datar, por lo que cada estudio merece una aproximación personalizada al empleo de edades individuales o medias, y considerando además el resto de características geoquímicas y morfológicas que las nuevas técnicas analíticas permiten obtener.

Palabras claves: circón, geocronología de U-Th-Pb, difusión, edades promedio, edades individuales

1 Introducción

La datación absoluta mediante isótopos de U-Th-Pb en circones ha experimentado un importante auge gracias al avance de las técnicas microanalíticas (Williams, 1998), que permiten obtener precisas medidas de las relaciones isotópicas en pequeños cristales o zonas cristalinas, y así relacionar edades, morfología, fases de crecimiento y composición, entre otras características (p.ej. Miller et al., 2007; Wang, et al., 2011; Díaz-Alvarado et al., 2013). Este avance es en parte responsable de la aportación de las edades U-Pb en circón a la discusión científica en tópicos como la formación de batolitos (Glazner et al., 2004, Coleman et al., 2004), la naturaleza de la petrogénesis de granitoides (Watson y Harrison, 2003; Belousova et al., 2002; Miller et al., 2011), los procesos de asimilación (Díaz Alvarado et al., 2011), o los lapsos de tiempo empleados en el reciclaje cortical (Jeon et al., 2012).

Sin embargo, la forma de afrontar el estudio geocronológico varía en función de los problemas a atajar y los tipos de rocas implicados. Mientras que las edades promedio han sido ampliamente utilizadas para estimar edades de cristalización o emplazamiento en batolitos fundamentalmente (p. ej. Castro et al., 2011), las edades

individuales de un solo circón o familia morfológica de circones ha tomado el relevo para el estudio del emplazamiento secuencial (Miller et al., 2011; Díaz Alvarado et al., 2013). Además, las edades estimadas para los procesos volcánicos requieren de conocer los datos geocronológicos más jóvenes de los registros de ignimbritas (Chamberlain et al., 2014), la datación de procesos metamórficos se basa en recristalizaciones tardías y relaciones geoquímicas (Wang et al., 2011), o la proveniencia y edad de depositación de unidades sedimentarias necesita de un gran número de análisis y un registro completo de edades heredadas en circones o núcleos de circones relictos (p. ej. Pereira et al., 2012).

Es paradójica la presencia de amplios rangos de edades, de 10 a 15 Ma, en la población de circones obtenida de unos pocos Kgrs de muestra (p. Ej., 5 Kgrs), lo que lleva al empleo de la estadística para la obtención de edades significativas. Sin embargo las edades promedio eliminan datos cuyos parámetros analíticos e incertidumbres son idénticos a los datos que si están incluidos en la edad obtenida mediante las medias (p. ej. *Concordia* y *“Mean” ages*). De ahí que sea necesaria una reflexión y un amplio conocimiento de los procesos de difusión, el decaimiento radioactivo, los parámetros estadísticos y otros aspectos morfológicos y geoquímicos del circón para aprovechar la importante información generada en la geocronología de U-Th-Pb en circones.

2 Geoquímica de U-Th-Pb y difusión

Las edades obtenidas mediante el método de U-Th-Pb en circones registran un proceso geoquímico basado en la saturación de un sistema magmático (Watson y Harrison, 2003), el enfriamiento bajo una temperatura de bloqueo (Cliff, 1985), más una serie de asunciones que incluyen los cálculos radiométricos (constantes de decaimiento) y el mantenimiento de un sistema cerrado. Además, a través de estudios experimentales y estadísticos, se han establecido temperaturas de saturación en circón en función de la composición, lo que permite conocer temperaturas mínimas de generación para magmas sub-saturados, y máximas para magmas saturados (Watson y Harrison, 2003, Miller et al., 2003).

Los coeficientes de reparto establecidos según el estudio estadístico de las concentraciones de U y Th en muestras de diferente composición arrojan valores considerablemente mayores para rocas máficas e intermedias que para composiciones graníticas, y para el U que para el Th, determinado por el mayor radio iónico de este último ($D_U=81$ y $D_{Th}=8.2$ para composiciones graníticas y $D_U=169$ y $D_{Th}=59$ para composiciones máficas e intermedias). Este hecho puede deberse al efecto de la mayor temperatura de cristalización en composiciones más básicas (expansión de las redes cristalinas) (Wang et al., 2011). Los isótopos padre radioactivos (U y Th) tienden a concentrarse en las redes cristalinas durante el crecimiento de los circones, mientras el Pb no es incorporado, por lo que la mayoría del Pb encontrado en circones es producido por decaimiento radioactivo. Sin embargo, el Pb no radiogénico está presente incluso en circones que aparentemente no se encuentran afectados por procesos metamórficos o de contaminación (Bea y Montero, 2013).

La difusión juega un papel fundamental en numerosos procesos geológicos: 1) la interpretación de la edad de las rocas y su evolución térmica, 2) el control de las temperaturas de bloqueo, y 3) las condiciones de formación y retención de la composición y la zonación química e isotópica en las fases minerales (Cherniak, 2010). En el caso del Pb, su valencia +2 y su gran radio iónico compiten por aumentar o disminuir las velocidades de difusión. Aunque las tasas de difusión del Pb no se diferencian demasiado de las REE, las diferencias en la energía de activación resultan en significativas diferencias en la difusión a las temperaturas a las que se producen muchos e importantes procesos geológicos, por lo que las importantes zonaciones observadas en los circones pueden no suponer una preservación completa de las relaciones isotópicas (Cherniak, 2010). Sin embargo, algunos autores interpretan que la preservación de las edades y relaciones isotópicas, incluso a altas temperaturas, se debe a que el Pb se presenta con valencia +4, por lo que su difusividad sería varios órdenes de magnitud menor que la del Pb^{+2} (Kramers et al., 2009).

Debido a la temprana cristalización del circón (Watson y Harrison, 2003), que en su mayoría se encuentra como inclusión en fases ferro-magnesianas (anfíbol o biotita), y su larga vida en los procesos magmáticos, es importante conocer el efecto de la difusión entre los diferentes dominios composicionales del circón durante los cambios térmicos producidos (Bea y Montero, 2013 y referencias), como por ejemplo durante la inclusión de circones relictos en procesos anatécticos o de asimilación (Díaz-Alvarado et al., 2013), o por la mezcla de circones de varios pulsos magmáticos (Miller et al., 2007).

3 Significado estadístico de las edades promedio y edades individuales

Los resultados del análisis de los isótopos de U-Th-Pb en circón arrojan una edad que contiene un error \pm . En principio, los errores incluyen toda la incertidumbre, excepto la derivada del error en el cálculo de la constante radiactiva. Debe ser considerado que la propagación de errores es siempre una aproximación. En este caso, dificultada porque la correlación entre las variables (ej. Pb-U y Pb-Pb) no se conoce perfectamente. Algunos parámetros que se consideran como una medida de la aproximación del dato obtenido a la realidad son el f_{206} (una estimación del porcentaje de Pb común), o el porcentaje de discordancia entre las diferentes edades calculadas, sin que, según los expertos consultados, esto garantice completamente la total semejanza entre el resultado y la edad real.

Las edades promedio, por ejemplo Concordia y “Mean” (ver Isoplot, Ludwig, 2003), son consideradas buenas cuando el número de datos es considerable (>10), son concordantes y tienen un error bajo, y el MSWD de la media es bajo (<1.5) y la probabilidad alta. En cuanto a las edades individuales, estas dependen de la corrección. Datos que presentan altos porcentajes de Pb común pueden ser perfectamente corregibles, sin embargo, si además hay otras causas de discordancia, la corrección ubica el dato en la concordia pero en una posición (edad) que no le corresponde. Edades concordantes pueden ser producto de la mezcla de dos zonas incluidas en un mismo análisis. Así, es necesario un estudio detallado de las imágenes del circón en luz reflejada, transmitida y catodoluminiscencia para evitar que el análisis se realice sobre áreas alteradas, con fracturas o límites entre zonas de diferente luminosidad en el cristal, donde los procesos metamórficos y difusivos son más probables.

Con respecto al número de análisis para obtener una población significativa de datos, esto dependerá de la complejidad de la muestra y los cristales. Mientras que algunas facies ígneas presentan resultados constantes y el número de análisis puede reducirse, muestras que hayan sido sometidas a largos procesos metamórficos pueden presentar datos muy heterogéneos, por lo que deben ser estudiados mediante una amplia población de datos. En todos estos casos, la presencia de un solo dato con una edad concreta puede ser relevante. En el caso de los estudios de circones heredados, el número de análisis es fundamental para que todos los picos de frecuencia estén representados en el registro.

4 Ejemplos

Como ejemplos para ilustrar esta disertación se presentan en la Figura 1 dos muestras: granitoides intrusivos del batolito del Sistema Central español (Díaz-Alvarado et al., 2013) e ignimbritas de Piedra Parada (Argentina) (Aragón et al., 2015, en preparación).

Los granitoides intrusivos presentan un rango de datos que ocupa 25 Ma y presenta circones de diferentes características, en función de las cuales han sido agrupados y relacionados con edades. Así, se pueden diferenciar anticristales (ver nomenclatura de Miller et al., 2007), varias fases de crecimiento intrusivas y crecimientos muy tardíos (Díaz-Alvarado et al., 2013). En la figura 1 se muestra como se ha establecido un grupo de datos para calcular la edad de Concordia, dejando fuera las mayores y menores edades para mantener unos parámetros estadísticos aceptables. Aún así, el amplio rango de edades baja mucho la probabilidad, y los datos 1 y 3, error incluido, quedan fuera del cálculo. Los porcentajes de Pb común y discordancia son parecidos para los datos empleados y no usados en el cálculo de la edad de Concordia, estando ubicados los puntos de análisis en áreas limpias de fracturas y discontinuidades mayores.

Para la muestra de ignimbritas (Fig. 1), las edades se encuentran muy concentradas en torno a la edad de Concordia calculada, sin embargo, al enfocarse el estudio en la datación del proceso eruptivo, la edad más relevante es la más joven, ya que muestra la edad a la cual cristalizó el último circon previo a la extrusión (Chamberlain et al., 2014). Sin embargo, los circones de las ignimbritas pueden también registrar un rango de edades mucho mayor, reflejando así procesos petrogenéticos y de ensamblaje de cámaras magmáticas. El caso de varias unidades ignimbriticas, con diferentes registros de edades, pero que coinciden en la edad más joven, es ideal para definir los procesos eruptivos (Aragón et al., 2015, en preparación).

5 Discusión y conclusiones

Los nuevos trabajos geocronológicos muestran que el estudio combinado de las edades registradas por los isótopos de U-Th-Pb, la morfología, la estructura interna y la geoquímica de los circones permite extraer una gran cantidad de información que va más allá de aportar una edad de un proceso concreto. Las edades promedio permiten obtener medias de grupos de datos muy agrupados, que generan una buena estadística y eliminan algunas incertidumbres inherentes al proceso analítico y del tratamiento de datos. Sin embargo, la obtención de promedios puede generar edades sin significado geológico si las edades agrupadas definen procesos distintos, como

ocurre en la datación de batolitos compuestos por sucesivos pulsos intrusivos.

Las edades individuales, aún teniendo parámetros analíticos correctos, deben ser sometidas a un importante escrutinio para ser consideradas relevantes dentro de un grupo de datos (ubicación del análisis, corrección empleada, etc...). Sin embargo, son una gran herramienta a la hora de analizar procesos complejos ígneos y metamórficos, donde los circones son sometidos a varios procesos de cristalización y disolución.

Los nuevos estudios experimentales y numéricos sobre la estabilidad y difusión del circon en sistemas magmáticos son fundamentales para poder conocer la reacción de los sistemas isotópicos ante las variaciones de presión y temperatura, y conocer así si los, en ocasiones, amplios rangos de edad encontrados en nuestras muestras se deben a efectos de la difusión o a la reacción de los relojes isotópicos ante largos procesos geológicos.

Agradecimientos

Quiero agradecer especialmente la contribución de la Dra. Pilar Montero de la Universidad de Granada por sus comentarios y aclaraciones sobre el empleo de los datos geocronológicos. Este trabajo es desarrollado como parte del proyecto FONDECYT de Iniciación n° 11140722, con el apoyo del proyecto interno de la Universidad de Atacama DIUDA-22273.

Referencias

- Bea, F.; Montero, P. 2013. Diffusion-induced disturbances of the U-Pb isotope system in pre-magmatic zircon and their influence on SIMS dating. A numerical study. *Chemical Geology* 349–350: 1–17.
- Belousova, E.A.; Griffin, W.L.; O'Reilly, S.Y., Fisher, N.J. 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 143: 602–622.
- Castro, A.; Moreno-Ventas, I.; Fernández, C.; Vujovich, G.; Gallastegui, G.; Heredia, N.; Martino, R.D.; Becchio, R.; Corretgé, L.G.; Díaz-Alvarado, J.; Such, P.; García-Arias, M.; Liu, D.Y. 2011. Petrology and SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Cordilleran granitoids of the Bariloche area, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 32: 508–530.
- Chamberlain, K.J.; Wilson, C.J.N.; Wooden, J.L.; Charlier, B.L.A.; Ireland, T.R. 2014. New Perspectives on the Bishop Tuff from Zircon Textures, Ages and Trace Elements. *Journal of Petrology*, 55(2): 395–426.

Cherniak, D.J. 2010. Diffusion in accessory minerals: zircon, titanite, apatite, monazite and xenotime. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 72: 827–869.

Cliff, R.A. 1985. Isotopic dating in metamorphic belts. *J. geol. Soc. London* 142: 97-110.

Coleman, D.S.; Gray, W.; 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.

Díaz Alvarado, J.; Castro, A.; Fernández, C.; Moreno-Ventas, I. 2011. Assessing bulk assimilation in cordierite-bearing granitoids from the Central System batholith, Spain; experimental, geochemical and geochronological constraints. *Journal of Petrology* 52: 223–256.

Díaz-Alvarado, J.; Castro, A.; Fernández, C.; Moreno-Ventas, I. 2013. SHRIMP U–Pb zircon geochronology and thermal modeling of multilayer granitoid intrusions. Implications for the building and thermal evolution of the Central System batholith, Iberian Massif, Spain. *Lithos* 175–176: 104–123.

Glazner, A.F.; Bartley, J.M.; Coleman, D.S.; Gray, W.; Taylor, R.Z. 2004. Are plutons assembled over millions of years by amalgamation from small magma chambers. *GSA Today* 14: 4–11.

Jeon, H.; Williams, I.S.; Chappell, B.W. 2012. Magma to mud to magma: rapid crystal recycling by Permian granite magmatism near the eastern Gondwana margin. *Earth and Planetary Science Letters* 319–320: 104–117.

Kramers, J.; Frei, R., Newville, M.; Kober, B.; Villa, I. 2009. On the valency state of radiogenic lead in zircon and its consequences. *Chemical Geology* 261: 4–11.

Ludwig, K.R. 2003. *Isoplot 3.0—a geochronological toolkit for Microsoft Excel*. Special Publication No. 4. Berkeley Geochronology Center, Berkeley, California (71 pp.).

Miller, C.F.; McDowell, S.M.; Mapes, R.W. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. *Geology* 31: 529–532.

Miller, J.S.; Matzel, J.E.P.; Miller, C.F.; Burgess S.D.; Miller, R.B. 2007. Zircon growth and recycling during the assembly of large, composite arc plutons. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 167: 282–299.

Miller, C.F.; Furbish, D.J.; Walker, B.A.; Claiborne, L.L.; Koteas, G.C.; Bleick, H.A.; Miller, J.S. 2011. Growth of plutons by incremental emplacement of sheets in crystal rich host: evidence from Miocene intrusions of the Colorado River region, Nevada, USA. *Tectonophysics* 500: 65–77.

Pereira, M.F.; Linnemann, U.; Hofmann, M.; Chichorro, M.; Solá, A.R.; Medina, J.; Silva, J.B. 2012. The provenance of Late Ediacaran and Early Ordovician siliciclastic rocks in the Southwest Central Iberian Zone: constraints from detrital zircon data on northern Gondwana margin evolution during the late Neoproterozoic. *Precambrian Research* 192–195: 166–189.

Wang, X.; Griffin, W.L.; Chen, J.; Huang, P.; Li, X. 2011. U and Th contents and Th/U ratios of zircon in felsic and mafic magmatic rocks: improved zircon-melt distribution coefficients. *Acta Geologica Sinica* 85: 164–174.

Watson, E.B.; Harrison, T.M. 1983. Zircon saturation revisited—temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters* 64: 295–304.

Williams, I.S. 1998. U–Th–Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben, M.A., Shanks III, W.C., Ridley, W.I. (Eds.), *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding*

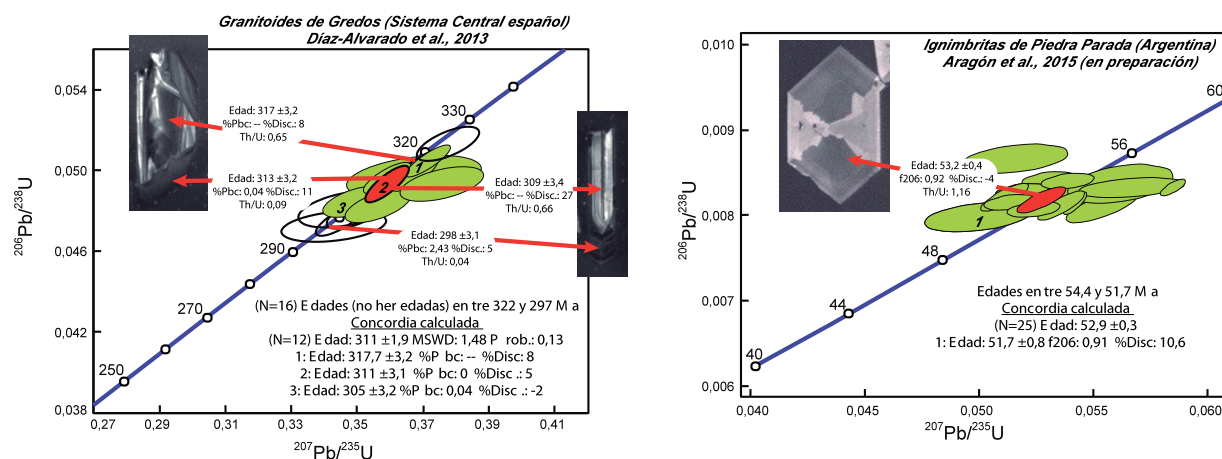


Figura 1. Ejemplo de empleo de datos geocronológicos en muestras complejas de granitoides (Díaz-Alvarado et al., 2013) y rocas volcánicas (Aragón et al., 2015, en preparación). La figura muestra los diferentes resultados y significados geológicos asignados a las edades en función del empleo de edades promedio o individuales.

Mineralizing Processes: *Reviews in Economic Geology* 7: 1–35.