

Fotografía de la cordillera de los Andes tomada desde un avión, a aproximadamente 33° de latitud sur, en el norte de la provincia de Mendoza. La quebrada principal que se observa pertenece al río Tupungato y en el fondo se puede ver el volcán homónimo de 6570m. Foto del autor



Maximiliano Naipauer

Instituto de Geocronología y Geología isotópica (INGEIS), UBA-Conicet

Circones, los relojes de la Tierra

La edad de la Tierra

Una roca nos evoca, primariamente, una montaña o una sierra y nos traslada imaginariamente a algún lugar en la cordillera de los Andes, las sierras pampeanas o las sierras de Tandil, por citar cordones montañosos de nuestro país.

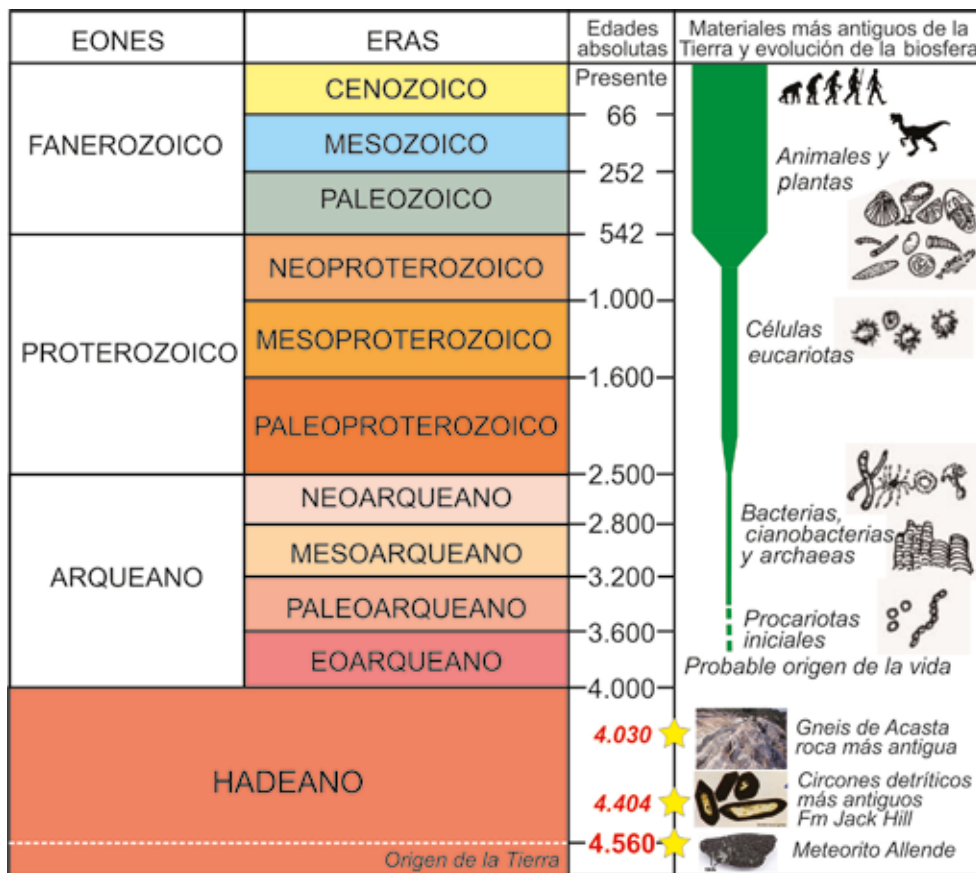
Rara vez nos interrogamos sobre su antigüedad o sobre cómo podemos deducirla. Para las ciencias, poder determinar con exactitud la edad de la Tierra y de los primeros estadios de su formación es fundamental. Nos ayuda a entender su evolución y corroborar las hipótesis sobre el origen de los continentes, los océanos, la atmósfera primitiva y la misma evolución de la vida. Al tiempo transcurrido desde la formación de la Tierra hasta el presente se lo denomina tiempo geológico, y la única manera que tenemos de cuantificarlo y saber qué sucedió en algún momento del pasado es a través del registro que se preserva en las rocas.

Las edades relativas a partir de los fósiles, el tiempo absoluto y la datación radiométrica

Hay dos tipos de edades que nos permiten referirnos al tiempo geológico: las edades relativas y las edades absolutas. Antes de que pudiéramos determinar la edad absoluta de las rocas y por ende la de la Tierra, la herramienta más utilizada fue la datación geológica relativa. Esta se basa en los principios fundamentales de la estratigrafía y la sucesión faunística en el registro fósil; se supone que los fósiles alojados en los estratos superiores son los más jóvenes. Estos principios dieron origen a la bioestratigrafía, que es la rama de la paleontología utilizada para establecer edades relativas a partir del estudio detallado de la aparición y extinción de diferentes organismos. El registro fósil es, por lo tanto, un elemento primordial, pero es aplicable solo a una pequeña porción del tiempo geológico. Se

¿DE QUÉ SE TRATA?

Las dataciones radiométricas uranio-plomo en minerales de circonio como herramientas para obtener las edades de los distintos eventos geológicos.



Escala de tiempo geológico con sus divisiones en eones y eras desde el origen de la Tierra hasta el presente. Los valores de las edades absolutas están expresados en millones de años.

restringe al Fanerozoico —últimos 542 millones de años—, que es cuando está bien representado debido a la diversificación de los animales y las plantas. Las edades relativas nos permiten ordenar los eventos geológicos y las rocas que forman una sucesión, por ejemplo, qué está primero, segundo, y así sucesivamente. No podemos conocer la edad real en años pero sí determinar qué es más antiguo o más joven en forma relativa.

Para los científicos conocer la edad geológica relativa de una roca o un fósil no es suficiente. Con edades absolutas se pueden cuantificar las edades relativas, determinar la duración en años de los períodos geológicos y determinar así cuánto tiempo se desarrolló una forma de vida hasta su desaparición. El descubrimiento de la radiactividad en 1896 por Henri Becquerel fue el primer paso para desarrollar el método de datación absoluta. Este método está basado en el decaimiento radiactivo de un conjunto de elementos químicos que están presentes en los minerales. Los elementos están constituidos por átomos que poseen un núcleo y electrones; a su vez, el núcleo está formado por protones y neutrones. Muchos de los elementos poseen isótopos, que son subespecies atómicas de un mismo elemento pero que difieren en el número de neutrones. Hay dos tipos de isótopos: los es-

tables y los inestables o radiactivos. Estos últimos son los utilizados para las dataciones radiométricas.

Los isótopos radiactivos de un elemento ('padres') poseen un núcleo atómico inestable y se transforman en otro isótopo —del mismo u otro elemento— más estable ('hijo'), liberando energía y partículas. A este proceso se lo conoce como radiactividad natural y uno de sus aspectos importantes es que la velocidad de decaimiento o desintegración de cada isótopo padre en su hijo es siempre la misma y no depende de la cantidad inicial, los cambios de temperatura y presión o los procesos químicos involucrados; tan solo depende de cada elemento. Por lo tanto, si conocemos la velocidad de desintegración de un isótopo padre y podemos medir la relación que existe entre este y el isótopo hijo es posible calcular la edad geológica absoluta de una roca o mineral.

De acuerdo con la antigüedad y el tipo de roca que necesitamos analizar se pueden utilizar diferen-

tes isótopos como binomios padre-hijo: el potasio-argón (K-Ar), el argón-argón (Ar-Ar), el rubidio-estroncio (Rb-Sr), el uranio-plomo (U-Pb) y el carbono (C) decauyendo a otro isótopo del mismo elemento (C^{14}). Sin lugar a dudas el sistema isotópico mejor conocido y más utilizado en la actualidad es el U-Pb debido a que el uranio posee una velocidad de desintegración muy baja y por lo tanto tiene una vida media muy grande. La vida media es una característica de cada isótopo radiactivo y se define como el tiempo necesario para que el isótopo padre se desintegre a la mitad. Hay vidas medias muy cortas y otras que duran miles de millones de años. El uranio posee dos isótopos radiactivos que son utilizados para datar las rocas, el U^{238} (isótopo padre) decae a Pb^{206} (isótopo hijo) con una vida media de 4470 millones de años y el U^{235} decae a Pb^{207} con una vida media de 700 millones de años —muy útiles para calcular la edad de las rocas más antiguas de la Tierra—. Otros isótopos con vida media grande son el Rb^{87} (48.800 millones de años) y el K^{40} (1251 millones de años). Por otro lado, existen isótopos, como el C^{14} , que tienen una vida media corta (5730 años) y por lo tanto son muy útiles solo para calcular edades de materiales y eventos geológicos recientes (menos de 50.000 años).

Estos binomios isotópicos se encuentran en diferentes materiales presentes en la corteza terrestre, como minerales, fósiles y rocas, y difieren de acuerdo con los objetivos del estudio. Los minerales más utilizados para el sistema K-Ar son micas, anfíboles y feldespatos; para el sistema U-Pb se utilizan circón, titanita, monacita, baddeleyita y rutilo. El sistema Rb-Sr es común utilizarlo en roca total y minerales como micas y anfíboles. Como el C^{14} está presente en los seres vivos, el método de datación del radio-carbono (C^{14}) es muy usado en materiales arqueológicos, huesos y fósiles.

El circón: un mineral microscópico capaz de revelar la edad de las rocas

Los circones –cuya fórmula química es $ZrSiO_4$ – son minerales de pequeño tamaño que cristalizan a partir de una gran variedad de rocas ígneas y pueden recrystalizarse en rocas metamórficas. Además, por erosión de estas últimas existen también circones en rocas sedimentarias. Debido a su estructura atómica y sus características físico-químicas, los circones se mantienen estables durante largos períodos. Son uno de los minerales más utilizados para obtener edades absolutas ya que pueden incorporar muchos elementos (uranio, torio, titanio, hafnio y el grupo de las tierras raras) en su estructura cristalina en reemplazo del zirconio (Zr). Una vez cristalizados, retienen estos elementos con los que comparte el número de valencia y radio iónico, y, por ello, los dotan de características químicas muy similares. Particularmente, poseen altos contenidos de uranio (entre 100 y 1000ppm) y por este motivo son uno de los minerales de datación por U-Pb por excelencia.

Los minerales que constituyen las rocas ígneas se forman a partir del magma que, por su menor densidad, asciende a través de la corteza y al enfriarse cristaliza los minerales. Las rocas ígneas pueden ser plutónicas o volcánicas según la velocidad de enfriamiento. Las primeras cristalizan en profundidad y las segundas cercanas y/o en superficie. Los circones son minerales accesorios muy comunes en las rocas plutónicas, como granitos, granodioritas y tonalitas, y también en rocas volcánicas como dacitas y riolitas. Además, los circones pueden formarse en las rocas metamórficas, donde los minerales crecen en estado sólido. En ciertas condiciones de altas temperaturas y presiones, el circón puede recrystalizarse y ello permite conocer la edad del metamorfismo (es decir, cambios de presión y temperatura en la corteza que inducen el metamorfismo).

Por último, hay que destacar que los circones son muy abundantes en las rocas sedimentarias aunque no son mi-

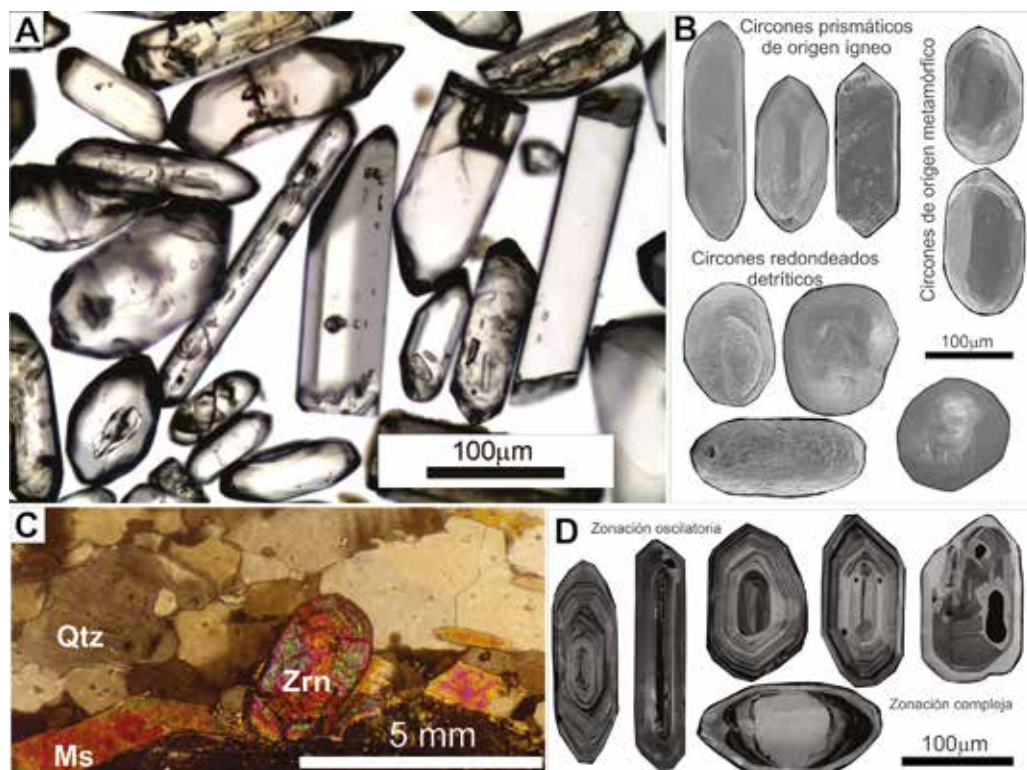


La medición de las cantidades de los isótopos padre e hijo en una muestra se realiza con un espectrómetro de masas, instrumento analítico de alta precisión que permite discriminar y medir las masas atómicas de los isótopos. Una vez medidas se calcula la edad del material a través de algoritmos. En primer plano, el sistema de ablación láser RESolution-SE de 193nm dotado con una celda para muestras y controlado por software. Al fondo se encuentra el espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) triple cuadrupolo Agilent 8900. Este equipamiento pertenece al La.Te.Andes, laboratorio ubicado en la ciudad de Vaqueros, provincia de Salta. Foto Roberto Hernández

nerales autigénicos (no se formaron durante la sedimentación), sino granos detríticos originados en rocas ígneas o metamórficas previas. Particularmente, son muy utilizados porque brindan información sobre las áreas de aporte sedimentario y permiten determinar edades máximas de sedimentación (edad más antigua a partir de la cual el sedimento pudo haberse depositado en la cuenca) en las rocas sedimentarias antiguas o carentes de fósiles. El estudio de la morfología externa y textura interna de los cristales a través de imágenes tomadas por microscopios electrónicos permite clasificar los circones según su origen ígneo, metamórfico o sedimentario.

Métodos para determinar una edad en circones

La edad de los circones se obtiene a través de una técnica que se denomina, en forma genérica, espectrometría de masas y que consiste en separar a los elementos que constituyen el mineral en función de su masa. Tres técnicas de espectrometría son las usadas: la de ionización térmica y dilución isotópica (ID-TIMS, *Isotope Dilution Thermal Ionization Mass Spectrometer*), la de iones secundarios (SIMS, *Secondary Ion Mass Spectrometer*) y la de plasma acoplado inductivo y láser de ablación (LA-ICP-MS, *Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer*). La primera fue desarrollada



A. Microfotografía tomada con microscopio óptico a grano suelto donde se observa una gran variedad de morfologías de cristales. B. Granos de circón clasificados de acuerdo con su morfología externa, tomados con un microscopio electrónico de barrido. C. Microfotografía tomada con microscopio óptico de una lámina delgada de una roca metasedimentaria con detalle de un circón detrítico (Zrn) en un mosaico de cuarzo (Qtz) y muscovita (Ms). D. Imágenes de catodoluminiscencia de circones donde se pueden observar sus texturas internas; los cristales de la izquierda tienen típica zonación oscilatoria indicativa de su origen ígneo y los de abajo y a la derecha con texturas complejas relacionadas con crecimientos metamórficos.

en la década de 1950, la segunda a partir de la de 1980 y la última se aplicó a geocronología a partir de los años 90. La explosión de datos geocronológicos en las publicaciones desde el 2000 se debe, probablemente, a la disponibilidad de los datos de la última.

El desarrollo reciente de técnicas analíticas, que permiten obtener edades absolutas a partir de un pequeño volumen en un cristal único e *in situ*, se complementa con análisis detallados de imágenes obtenidas con microscopios electrónicos y de catodoluminiscencia. Estas imágenes muestran las texturas y estructuras internas complejas de los cristales y permiten seleccionar un área específica a datar dentro de los cristales. Por lo tanto, estos métodos (SIMS y LA-ICP-MS) nos permiten registrar edades diferentes en un mismo cristal que indican distintas etapas dentro de su historia de crecimiento.

El circón se está utilizando para desentrañar sistemas geológicos cada vez más complejos, y presenta oportunidades interesantes para la investigación más avanzada en ciencias de la Tierra. En la Argentina hay dos laboratorios, uno del Conicet (La.Te.Andes, www.lateandes.com) y otro en el Servicio Geológico Minero Argentino (Segemar), que están desarrollando dataciones U-Pb (LA-ICP-MS) en circón con instrumental de última generación adquiridos con fondos públicos y privados. Estos proyectos servirán, sin lugar a duda, para el mejor conocimiento de la geología de la región y se convertirán en un pilar fundamental para la exploración de recursos naturales en el ámbito público y en el privado.

La edad de la Tierra y las rocas más antiguas de nuestro país según los circones

Las condiciones de la Tierra en su nacimiento eran muy distintas a las actuales. Predominaba el estado fundido sobre el sólido, y esto hace que el año uno de la Tierra sea muy difícil de determinar ya que el registro geológico no se preservó. Sin embargo, el estudio de materiales extraterrestres nos brinda información muy valiosa sobre el origen y la evolución del sistema solar y del planeta Tierra. Las edades más antiguas obtenidas provienen de materiales rocosos extraídos de meteoritos, como el Allende o el Juvinas, e indican –usando métodos como el K-Ar y el U-Pb– edades de 4560 millones de años. Si tomamos en cuenta que el sistema solar y los planetas se formaron juntos y que estos meteoritos pueden provenir de planetas destruidos en el inicio del sistema solar, se considera que la Tierra debió haber tenido algún tipo de corteza sólida tan antigua como 4560 millones de años. Este valor es, por lo tanto, el aceptado actualmente por la comunidad geológica como la edad de la Tierra. Cabe destacar que el geólogo norteamericano Clair Patterson (1922-1995) fue el primero que, midiendo isótopos de plomo y eliminando abnegadamente toda posible contaminación, proclamó en 1956 que la Tierra tenía una edad de 4550 ± 70 millones, una cifra que recién se actualizó en 2001 (ver recuadro ‘Un milímetro de roca’).

UN MILÍMETRO DE ROCA

¿Cómo se llega a determinar la edad de una roca que tiene casi la edad de la Tierra, a partir de un mineral que no mide más de 1mm? Lo primero que se realiza es el estudio en el campo, donde se recolectan las muestras de rocas de interés que mejor representan a la unidad estudiada, y que serán analizadas por el método radiométrico (figuras 1 y 2). Luego, las rocas seleccionadas son molidas y tamizadas y el polvo obtenido es lavado en agua en una batea, para concentrar aquellos minerales más pesados. Los concentrados de minerales de circonón y de otros minerales pesados se extraen luego con un separador magnético. La purificación final de las muestras se logra seleccionando manualmente los circones con una aguja de acupuntura y una lupa binocular (figura 3).

Los circones se montan luego en moldes que se rellenan con una mezcla para formar una resina (figura 4). Una vez que la resina está completamente seca, luego de un día, cada molde se pule para que las superficies de los minerales queden expuestas para análisis en el espectrómetro de masa (figura 5). Los datos 'crudos' que se obtienen se procesan y corrigen para finalmente llegar a los datos listos para ser usados.

En 2001, a partir del análisis de circones de rocas sedimentarias del monte Narryer y Jack Hills en Australia occidental, usando el método U-Pb junto con espectrometría de masas, se llegó a obtener la edad de las rocas más antiguas de la Tierra de 4.404 ± 8 millones de años.

Sin ir tan lejos, en la puna salteña, al noroeste de la Argentina, nuestro grupo de investigación de la Universidad Nacional de Salta-Conicet determinó edades de unos 515 millones de años en circones de rocas graníticas (rocas conformadas por minerales de cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, biotita y muscovita, rocas usadas en muchas mesadas de cocina) utilizando el mismo método pero diferente técnica analítica, la de LA-ICP-MS.

Nuestro grupo no solo estableció las edades de las rocas, sino que también pudo determinar las fuentes que les dieron origen. Esto se logró ya que,

además de los isótopos de U-Pb, se utilizaron isótopos de Lu-Hf para conocer el origen de las rocas graníticas. Se comprobó que las fuentes que originaron estas rocas de la puna salteña corresponden a una mezcla entre magmas (masas de rocas fundidas) del manto y magmas de la corteza terrestre. Queda claro que los circones son peculiares y juegan un papel muy relevante en la geología. Gracias a ellos, y al avance científico y tecnológico reciente, se han dado grandes progresos en el estudio de la evolución de la Tierra y los procesos que la formaron.

LECTURAS SUGERIDAS

ORTIZ A, HAUSER N, BECCHIO R, SUZAÑO N, NIEVES A, SOLA A, PIMENTEL M & REIMOLD W, 2017, 'Zircon U-Pb ages and Hf isotopes for the Diablillos Intrusive Complex, Southern Puna, Argentina: Crustal evolution of the Lower Paleozoic orogen, Southwestern Gondwana margin', *Journal of South American Earth Sciences*, 80: 316-339.

ORTIZ A, SUZAÑO N, HAUSER N, BECCHIO R & NIEVES A, 2019, 'New hints on the evolution of the Eastern Magmatic Belt, Puna Argentina. SW Gondwana margin: Zircon U-Pb ages and Hf isotopes in the Pachamama Igneous-Metamorphic Complex', *Journal of South American Earth Sciences*, 94: 102246.

WILDE SA, VALLEY JW, PECK WH & GRAHAM CM, 2001, 'Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.40 Gyr ago', *Nature*, 409 (6817): 175-178.



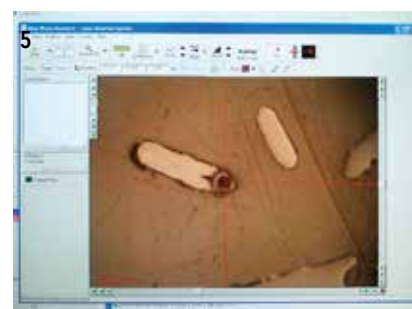
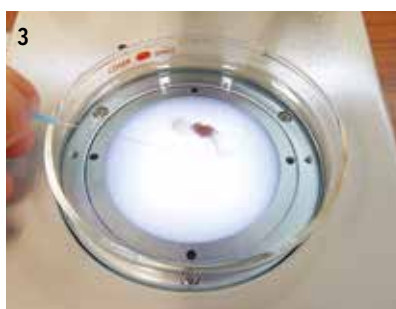
Agustín Ortiz

Doctor en ciencias geológicas, UNSa.

Profesional adscripto, FCN-UNSa.

Becario posdoctoral en el Instituto de Bio y Geociencias del NOA (IBIGEO)-Conicet.

agustinortiz13@hotmail.com



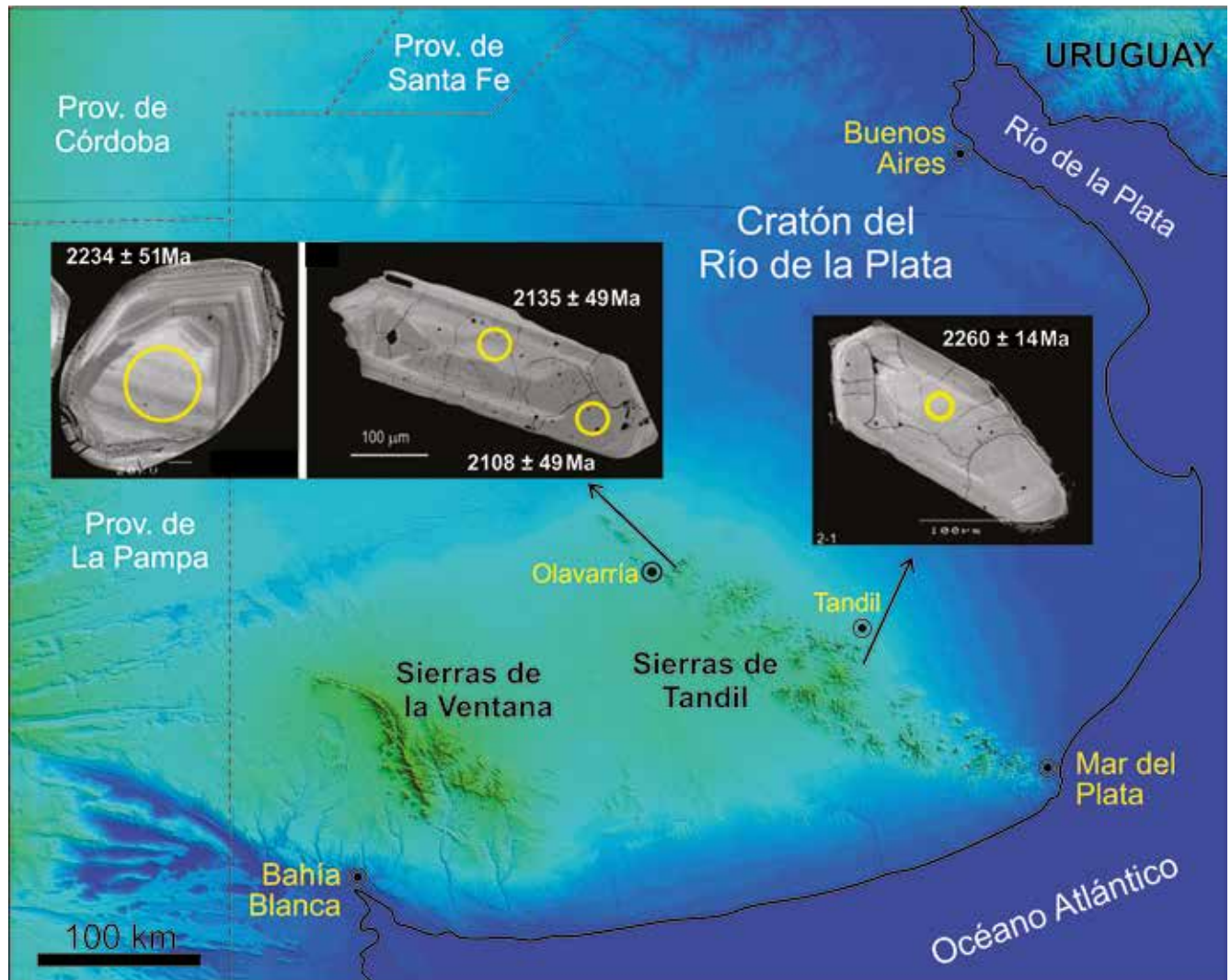


Imagen satelital de la provincia de Buenos Aires donde se muestran las sierras de Tandil y de la Ventana. Además, se agregaron microfotografías de catodoluminiscencia donde se observan cristales de circon datados por U-Pb (SHRIMP), los círculos amarillos muestran el sector analizado dentro del cristal y la edad obtenida (ver Cingolani en 'Lecturas sugeridas').

El mineral más antiguo proveniente de rocas terrestres son los circones detríticos obtenidos de rocas sedimentarias (areniscas y conglomerados) expuestas en la localidad de Jack Hill en el oeste de Australia. Si bien la edad de la sedimentación es del Eón Arqueano, los circones detríticos incluidos en las areniscas son más antiguos, con edades de 4404 millones de años –midiendo U-Pb con el método SHRIMP–, lo que sugiere que ya existían rocas graníticas en la corteza terrestre que contenían esos cristales. Por otro lado, la roca más antigua analizada es el gneis de Acasta en Canadá que arrojó una edad de 4030 millones de años –usando U-Pb en circon–. En el suroeste de Groenlandia también se han obtenido edades U-Pb en circon de ese orden de magnitud en rocas graníticas.

En la Argentina las rocas más antiguas que se conocen están expuestas en las sierras de Tandil, en el sureste de la

provincia de Buenos Aires. Estas rocas conforman el basamento ígneo-metamórfico del cratón del Río de la Plata que se extiende por debajo de gran parte de la provincia de Buenos Aires hasta las sierras de Córdoba bajo los sedimentos modernos de la llanura chaco-paranaense y aflora en la República Oriental del Uruguay. Las sierras de Tandil están formadas por pequeños cerros y sierras que no superan los 500 metros de altura y se elevan sobre la llanura pampeana. Las rocas ígneas y metamórficas están agrupadas en el Complejo Buenos Aires y han sido objeto de estudios geocronológicos en los últimos cincuenta años. Desde las primeras dataciones por los sistemas K-Ar y Rb-Sr se conoce que estas rocas tienen edades entre los 2200 y los 2000 millones de años (Paleoproterozoico inferior). Estos valores fueron confirmados en numerosos trabajos donde se han obtenidos edades U-Pb (SHRIMP) en circo-

nes separados de rocas metamórficas e ígneas, distribuidas desde el extremo noroeste, en la localidad de Olavarría, hasta las inmediaciones de la ciudad de Tandil, en la parte central del cordón serrano.

Consideraciones finales

Las dataciones radiométricas nos permiten establecer que la Tierra se formó hace 4.560 millones de años de acuerdo con las edades determinadas en meteoritos y en rocas de la Luna. Circones detríticos separados de rocas sedimentarias confirman fehacientemente que el planeta

ya contaba con una corteza continental sólida hace 4404 millones de años. La roca más antigua que se conoce arrojó una edad U-Pb en circón de 4030 millones de años. En nuestro país las rocas más antiguas, datadas por el método U-Pb, poseen edades en torno a los 2200 millones de años y están en las sierras de Tandil.

Cabe reflexionar sobre la inmensidad del tiempo geológico, medido en miles de millones de años, su relación con el origen de la vida en la Tierra y nuestra historia como especie humana comprendida por los últimos cientos de miles de años. El reconocimiento de la magnitud de la edad de nuestro planeta es considerado uno de los aportes más significativos que ha dado la geología al entendimiento de la naturaleza. **CH**

Agradecimientos

El autor desea agradecer a los revisores y al cuerpo editorial de la revista por sus contribuciones para mejorar la calidad de este manuscrito. También agradece a los profesores Carlos A Cingolani y Víctor A Ramos la lectura crítica y los comentarios realizados sobre la versión preliminar.

LECTURAS SUGERIDAS

BENEDETTO JL, 2018, *El continente de Gondwana a través del tiempo: una introducción a la geología histórica*, Academia Nacional de Ciencias, Córdoba.

CINGOLANI CA, 2011, 'The Tandilia System of Argentina as a southern extension of the Río de la Plata craton: An overview', *International Journal Earth Sciences*, 100 (2): 221-242.

PATTERSON C, 1956, *Age of meteorites and the Earth. Geochimica et Cosmochimica Acta*, 10 (4): 230-237.



Maximiliano Naipauer

Doctor en ciencias naturales, UNLP.

Profesor adjunto FCEN-UBA.

Investigador adjunto del Conicet.

Director del Instituto de

Geocronología y Geología Isotópica, UBA-Conicet.

maxinaipauer@gl.fcen.uba.ar