

CERRO TORO, LA RIOJA: HISTORIA Y GEOLOGÍA

Palabras clave: arqueología, petrología, magmatismo.

Key words: archaeology, petrology, magmatism.

El Cerro Toro, ubicado en el oeste de la provincia de La Rioja, Argentina, es un sitio de importancia histórica debido a los vestigios arqueológicos de culturas del pasado. Su nombre alude al toro, cuya figura se refleja en la silueta rocosa del faldeo occidental del cerro. Este artículo, con un enfoque geológico, explora los procesos que dieron origen al Cerro Toro, destacando la compleja interacción entre magmas y rocas preexistentes de la corteza. Estos procesos, ocurridos hace 480 millones de años, han moldeado la estructura actual del cerro, vinculando su rica historia cultural con su evolución geológica.

Cerro Toro, La Rioja: History and Geology

Cerro Toro, located in the western part of La Rioja province, Argentina, is historically significant due to archaeological remains from ancient cultures. Its name refers to the bull, whose figure is reflected in the rocky silhouette of the mountain's western slope. This article, with a geological focus, explores the processes that led to the formation of Cerro Toro, highlighting the complex interaction between magmas and pre-existing crustal rocks. These processes, which took place 480 million years ago, have shaped the current structure of the hill, linking its rich cultural history with its geological evolution.

■ Pablo H. Alasino¹⁻²

1. Centro Regional de Investigaciones Científicas y Transferencia Tecnológica de La Rioja (CRILAR-CONICET), CP: 5301, Anillaco, La Rioja, Argentina

2. Instituto de Geología y Recursos Naturales, Centro de Investigación e Innovación Tecnológica, Universidad Nacional de La Rioja (INGeReN-CENIIT-UNLaR), CP: 5300, La Rioja, Argentina

E-mail: palasino@conicet.gov.ar

INTRODUCCION

El Cerro Toro, situado en el oeste de la Sierra de Famatina, en la provincia de La Rioja, forma parte del contexto geológico de las Sierras Pampeanas (Fig. 1a). Este cerro tiene una importancia arqueológica debido a los vestigios de antiguas civilizaciones que habitaron la región, entre ellas la cultura Aguada (ca. 900-950 a 1350-1400 d.C.) (Callegari, 2004). El cerro incluye los sitios de Rincón del Toro y la Fortaleza del Cerro el Toro, los cuales se caracterizan por una alta concentración de unidades domésticas, conformadas por dos o tres recintos con diferentes tipos de circulación. La Fortaleza, debido a su ubicación estratégica y la presencia de puestos de control y canales superficiales en el terreno como troneras, parece haber jugado un rol importante en la defensa de la población, ya que ofrecía una vista completa del valle. La Figura

2 muestra una vista actual del valle tomada desde un área cercana a la Fortaleza, que evidencia la selección estratégica del emplazamiento en el pasado. Asimismo, en la zona se encuentran sitios con arte rupestre cuyas representaciones de alto contenido simbólico, sugieren que desempeñaron un rol importante en las relaciones intercomunitarias, similar a lo que se observa en los valles de Abaucán en Catamarca y Copiapó en Chile (Callegari, 2004).

El nombre "Cerro Toro" alude al toro, cuya figura se refleja en la silueta rocosa del faldeo occidental del cerro. Dicha silueta se forma por el contraste de color entre las rocas metamórficas negras y las rocas ígneas blanquecinas que conforman el cerro (Fig. 3). Estas rocas se formaron hace 480 millones de años, en una época en la que la vida en la Tierra se limitaba a organismos marinos simples, y el Cerro Toro se

desarrollaba en las profundidades de la corteza terrestre. A lo largo del tiempo, los procesos geológicos elevaron estas rocas hacia la superficie, donde hoy son expuestas a la erosión.

Este artículo se propone ilustrar los procesos que dieron forma al Cerro Toro, procesos que, tras millones de años, han contribuido a la valoración cultural que se expresa en su nombre. Para abordar este objetivo, se explorarán las evidencias geológicas y geoquímicas que permiten reconstruir su historia. Gracias a los avances en la precisión del análisis de la composición y edad de los magmas, los estudios científicos permiten ahora comprender mejor los procesos físicos y químicos que ocurren en el interior de la Tierra, así como la formación de las rocas en nuestro planeta.

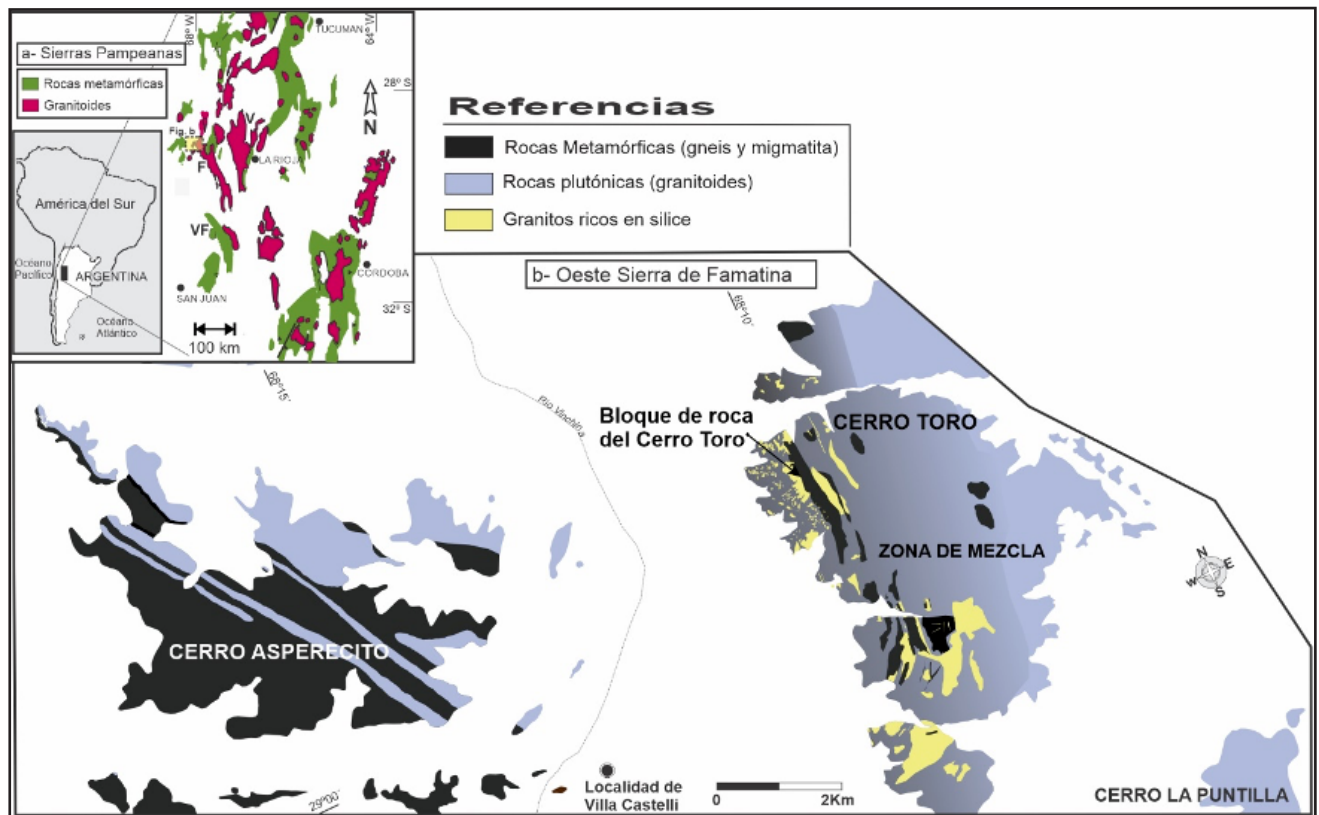


Figura 1: Mapas geológicos simplificados del noroeste argentino modificados a partir de Alasino et al. (2014). En (a) Sierras Pampeanas y (b) Sierra de Famatina occidental. Referencias en (a): F, Sierra de Famatina; V, Sierra de Velasco; SF, Sierra de Valle Fétil.



Figura 2: Fotografía panorámica que muestra desde la cima del Cerro Toro, sobre las migmatitas, el valle del Bermejo y al fondo la Precordillera y cordillera andina. Abajo a la izquierda, indicado con flecha roja, es posible ver la migmatita (roca de color oscura) con "canales" de rocas más clara.

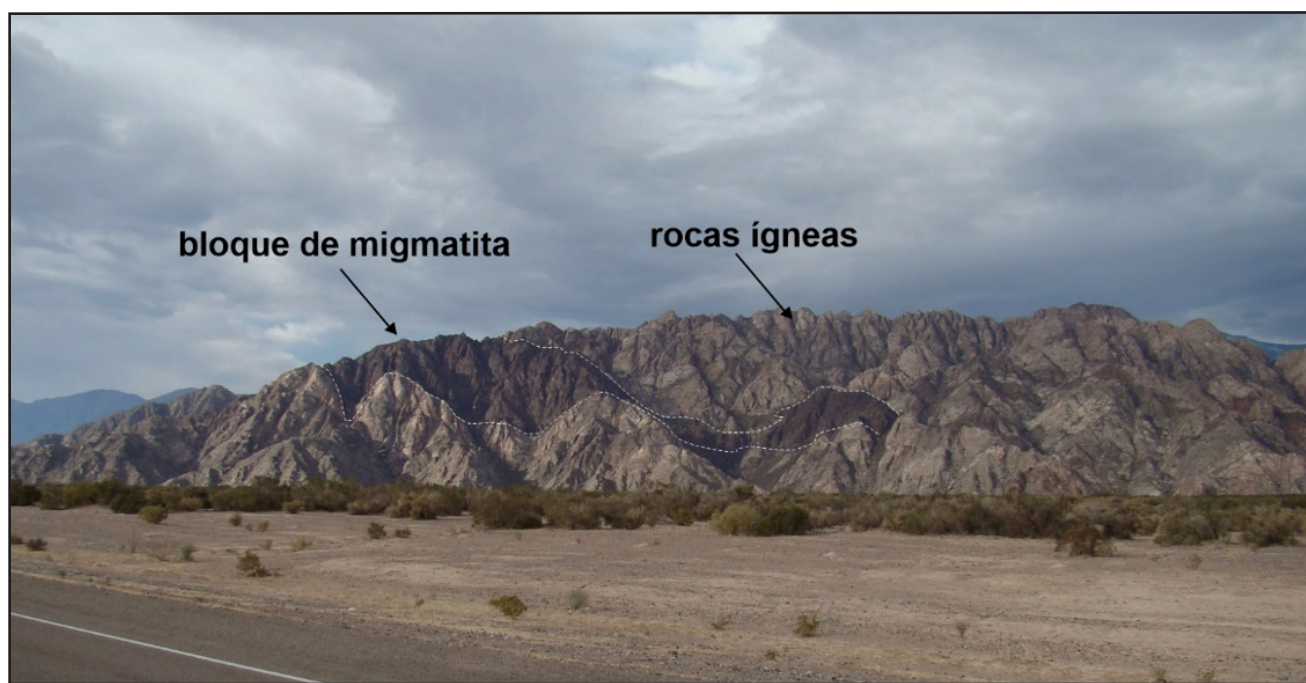


Figura 3: Fotografía panorámica que muestra el flanco occidental del Cerro Toro. La línea punteada blanca delimita el bloque de migmatita incluido en rocas ígneas que da nombre al cerro.

■ ROCAS ÍGNEAS Y METAMÓRFICAS

Las rocas ígneas se forman a partir de la cristalización del magma, ya sea en el interior de la corteza terrestre (rocas plutónicas) o en la superficie (rocas volcánicas). El magma es un fluido de alta temperatura (entre 750 °C y 1200 °C), compuesto principalmente por un líquido rico en sílice, además de sólidos y gases disueltos. A medida que el magma pierde calor durante su ascenso hacia la superficie, los elementos químicos que contiene se combinan mediante enlaces químicos para formar minerales. Entre los minerales más comunes en las rocas ígneas se encuentran el cuarzo, los feldespatos, las micas, los anfíboles y el olivino.

Los magmas que formaron el Cerro Toro, del tipo cordillerano, se originan en el manto superior y la corteza inferior debido a fuentes de calor causadas por el choque de placas tectónicas. En un proceso conocido como subducción, la placa

oceánica, más densa, se hunde bajo la placa continental, menos densa (Fig. 4). Este proceso es fundamental para la formación de magma, ya que transporta grandes volúmenes de agua a profundidades de hasta 80-100 km en el manto. El agua, liberada de los sedimentos marinos, reduce el punto de fusión de las rocas del manto, facilitando la formación de magma. Un ejemplo de este proceso es la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, que genera intensa actividad volcánica y sísmica en los Andes (Fig. 4). Las rocas plutónicas del Cerro Toro se formaron por procesos similares, pero hace 480 millones de años, conocido como el evento Famatiniano.

Dos propiedades físicas juegan un rol importante en el comportamiento del magma: la viscosidad y la densidad. La viscosidad es la resistencia que un fluido tiene al movimiento; en otras palabras, qué tan fácil o difícil es que fluya. En el caso

del magma, la viscosidad depende principalmente de la cantidad de sílice que contiene. Para entenderlo mejor, pensemos en alimentos que usamos a diario: un magma rico en sílice es muy viscoso, similar a la textura espesa de la pasta de maní, mientras que un magma con bajo contenido de sílice es más fluido, como el ketchup (salsa de tomate) (ej., Baker et al., 2004). La densidad del magma, por otro lado, también depende de su composición y afecta su capacidad para ascender hacia la superficie o quedarse atrapado en las profundidades de la Tierra. Cuando el magma asciende, puede provocar erupciones volcánicas. Sin embargo, si las condiciones no son favorables, el magma se enfría, se vuelve más viscoso y, por lo tanto, más resistente a moverse en el interior de la Tierra. Esto puede hacer que se detenga y se enfríe lentamente en el interior de la corteza terrestre, formando rocas plutónicas.

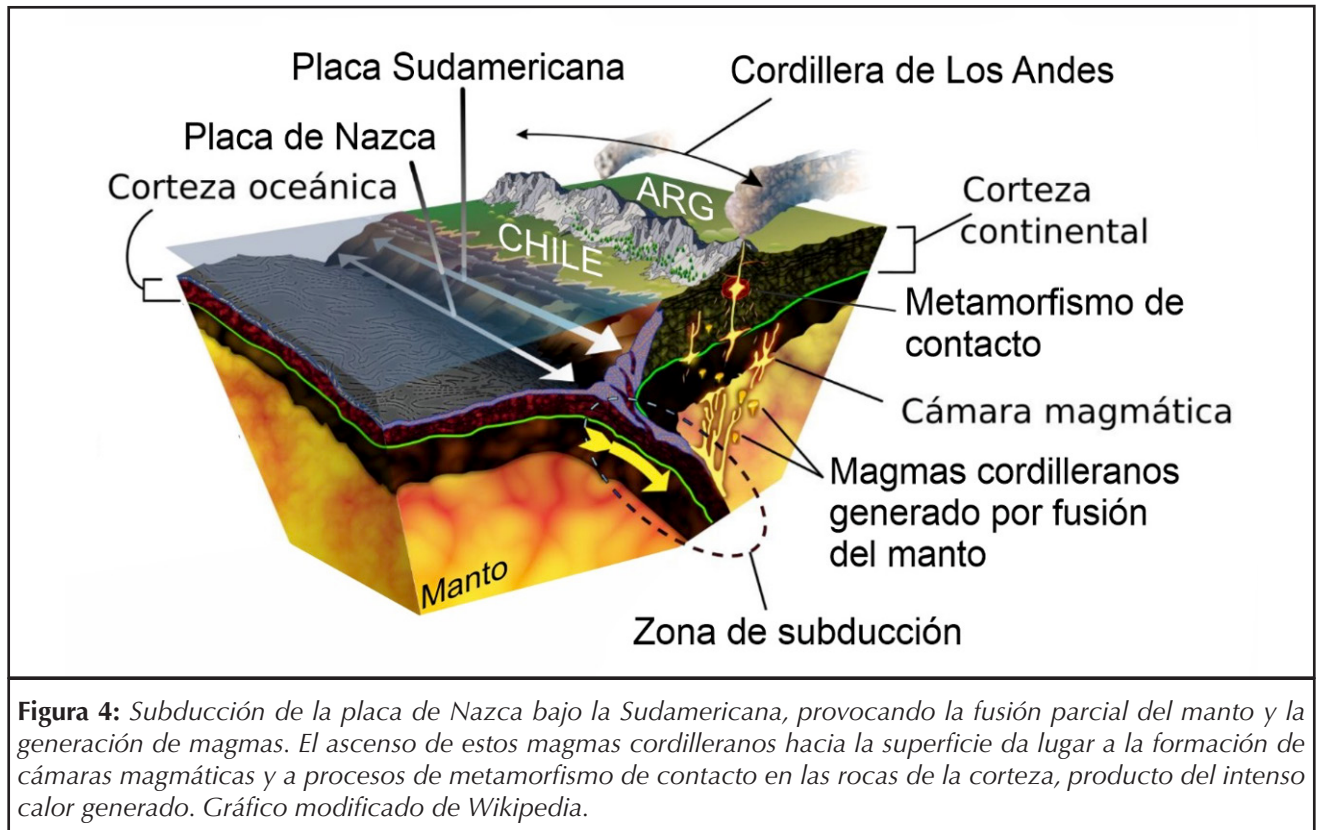


Figura 4: Subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana, provocando la fusión parcial del manto y la generación de magmas. El ascenso de estos magmas cordilleros hacia la superficie da lugar a la formación de cámaras magmáticas y a procesos de metamorfismo de contacto en las rocas de la corteza, producto del intenso calor generado. Gráfico modificado de Wikipedia.

A diferencia del magma que emerge a la superficie terrestre y se enfría rápidamente formando coladas de lava o nubes de ceniza, que contienen cristales muy pequeños y vidrio volcánico, el magma que permanece atrapado en el interior de la corteza terrestre experimenta un enfriamiento gradual a lo largo de miles o incluso millones de años. Este magma se acumula en cavidades en el interior de la Tierra conocidas como cámaras magmáticas. El lento enfriamiento del magma en estas cámaras permite la formación de cristales de gran tamaño, dando lugar a rocas plutónicas de textura gruesa, como el granito, una roca que comúnmente encontramos en las mesadas de nuestras cocinas.

El magma también puede interactuar con las rocas preexistentes de la corteza que lo contienen, modificando su composición y dando lugar a nuevas rocas llamadas me-

tamórficas. Las rocas metamórficas son aquellas que han cambiado su forma original debido a altas temperaturas y presiones en el interior de la Tierra. Un ejemplo de esto ocurre cuando el magma caliente interactúa con las rocas sólidas que lo rodean, sometiéndolas a altas temperaturas y, en algunos casos, fundiéndolas parcialmente para generar nuevos magmas (Fig. 4). Este proceso puede "contaminar" el magma cordillero, incorporando elementos químicos de las rocas preexistentes o fragmentos de las rocas metamórficas, resultando en un nuevo tipo de rocas ígneas llamadas híbridas, que se forman a partir de la cristalización de magmas contaminados.

■ GEOLOGÍA DEL CERRO TORO

La geología del Cerro Toro, junto con el Cerro Aspercito al oeste, separados por el río Vinchina, se caracteriza por una zona donde las rocas

han experimentado cambios significativos debido al calor del magma cordillero (Fig. 1b). Este fenómeno, conocido como metamorfismo de contacto, ocurre cuando el magma se introduce en rocas sólidas de la corteza terrestre, calentándolas y transformándolas sin llegar a fundirlas por completo. Este proceso tuvo lugar a unos 17 km de profundidad bajo la superficie (Saavedra et al., 1992; Alasino et al., 2014).

En la región se identifican dos tipos principales de rocas. Al oeste del Cerro Aspercito (Fig. 1b), predominan las rocas metamórficas que formaban la corteza sólida, representadas en el mapa con color negro. Estas rocas, llamadas gneises, se disponen en capas o lajas orientadas de norte a sur y están casi verticales. En contraste, en la zona este del Cerro Toro, se encuentran rocas plutónicas, representadas en azul, que se formaron cuando el magma cor-

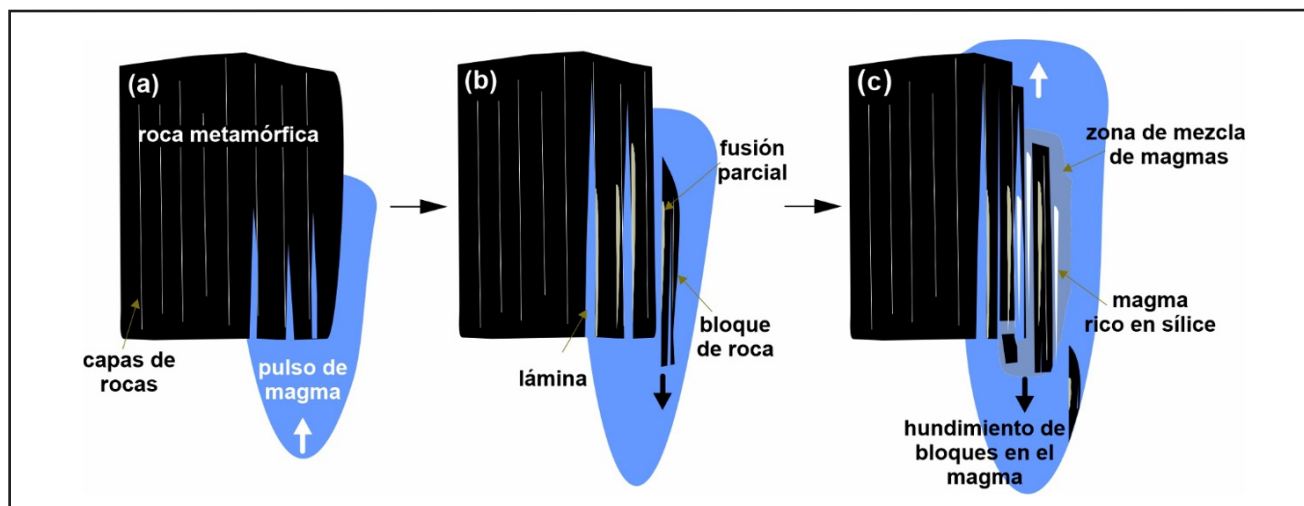


Figura 5: Evolución del Cerro Toro. (a) Ingreso del magma cordillerano en las capas de roca metamórfica. (b) Separación de láminas de la roca metamórfica, con fusión parcial debido al calor del magma. Los bloques de roca metamórfica se hunden, permitiendo un mayor ascenso del magma. (c) Generación de magmas ricos en sílice por fusión parcial de las láminas de roca metamórfica y mezcla de estos magmas con los cordilleranos, originando un nuevo magma híbrido.

dillerano se enfrió y solidificó, conocidas comúnmente como granito (Fig. 1b). Estas rocas plutónicas representan una antigua cámara magmática de grandes dimensiones que quedó atrapada en la corteza. En la zona intermedia del mapa, comprendida entre el noreste del Cerro Aspercito y el oeste del Cerro Toro, ambos tipos de rocas interactúan. Particularmente, al noreste del Cerro Aspercito, se observa cómo el magma se infiltró siguiendo las capas de las rocas metamórficas, como si fueran las páginas de un libro, creando estructuras laminadas. El calor del magma provocó que algunas partes de estas láminas de roca se fundieran parcialmente, formando un tipo de roca conocida como migmatita. Este proceso, evidente en el oeste del Cerro Toro, permitió que el magma fundiera parcialmente las láminas de roca, transformando parte de la roca sólida en líquido (magma), y generando así más espacio para el crecimiento de la cámara magmática. Esto resultó en un cambio en la composición mineral de las láminas,

dando lugar a migmatitas y la parte fundida formó magmas muy ricos en sílice representados en color amarillo en el mapa (Fig. 1b). Así, el Cerro Toro se interpreta como una zona de mezcla a lo largo del contacto entre el magma cordillerano y las rocas metamórficas de la corteza y sus fundidos ricos en sílice. Para ilustrarlo con un ejemplo culinario, esta zona de mezcla podría compararse con un bizcochuelo marmolado, donde la parte de chocolate representaría el magma cordillerano, la parte de vainilla líquida sería el material fundido de los bloques de roca metamórfica (magmas ricos en sílice), y los trozos de chocolate simbolizarían los bloques de rocas sólidas que resistieron la fusión por el calor del magma. Un modelo simplificado de los procesos se muestra en la figura 5.

En resumen, el área de mezcla de magmas del Cerro Toro se caracteriza tanto por una interacción física, observable en los grandes bloques de migmatitas dentro de las

rocas ígneas (uno de los cuales da nombre al Cerro Toro), como por aspectos químicos menos evidentes a simple vista. No obstante, mediante análisis geoquímicos de las muestras recolectadas en la región, es posible ilustrar el proceso de mezcla y contaminación del magma cordillerano con las rocas metamórficas de la corteza. Dentro del grupo de rocas metamórficas, las migmatitas, en comparación con los gneises, muestran un aumento en la mayoría de los elementos químicos, salvo en sílice, calcio y sodio, cuyos contenidos son menores (Fig. 6). Esto indica que las migmatitas, formadas por el derretimiento de los gneises debido al calor del magma cordillerano a temperaturas cercanas a los 800 °C, se enriquecen en elementos como titanio, hierro y magnesio, contenidos en minerales como biotita, cordierita y granate, mientras que liberan sílice, calcio y sodio, formando magmas ricos en cuarzo y plagioclasa (Fig. 6a). La representación gráfica de la figura 6, que intenta ilustrar de manera más práctica los proce-

que ocurrieron en el Cerro Toro, muestra la roca metamórfica (gneis) de la corteza siendo calentada por el magma cordillerano y formando migmatita, compuesta de una mezcla de sólidos y líquidos. Este proceso de fusión parcial es comparable a derretir un chocolate con nueces: las nueces (minerales ricos en hierro y magnesio) se quedan en el fondo, mientras que la parte líquida (rica en sílice) asciende por canales dentro de la roca. Estos canales, indicados por la flecha roja en la migmatita de la Figura 2, permiten que el líquido, al mezclarse con el magma cordillerano original, genere un nuevo tipo de magma con características intermedias, denominado magma híbrido. Este proceso de mezcla es similar a combinar jugos de naranja

y frutilla, dando como resultado una bebida completamente nueva. Químicamente, la mezcla de los magmas cordilleranos con los magmas ricos en sílice produce magmas híbridos con características químicas intermedias (Fig. 6b).

CONCLUSIÓN

El Cerro Toro es un ejemplo destacado de la interrelación entre la geología y la historia cultural en la región de La Rioja, Argentina. Además de su importancia arqueológica, este cerro ofrece una ventana única a los procesos geológicos que ocurrieron hace 480 millones de años, en las profundidades de la corteza terrestre. Los grandes bloques de migmatita incrustados en las rocas graníticas

del cerro actúan como ‘huellas dactilares’, evidenciando la fusión de rocas de la corteza y la mezcla de diferentes magmas. El estudio de estas rocas nos permite reconstruir la historia geológica de la región, comprender la formación de las montañas que dieron forma al paisaje y a la distintiva silueta del Cerro Toro, además de ofrecernos una visión más clara de cómo estos procesos han moldeado el entorno terrestre que habitamos hoy en día.

GLOSARIO

Sierras Pampeanas: Cadenas montañosas en el centro-noroeste de Argentina, formadas por rocas antiguas expuestas por procesos geológicos recientes.

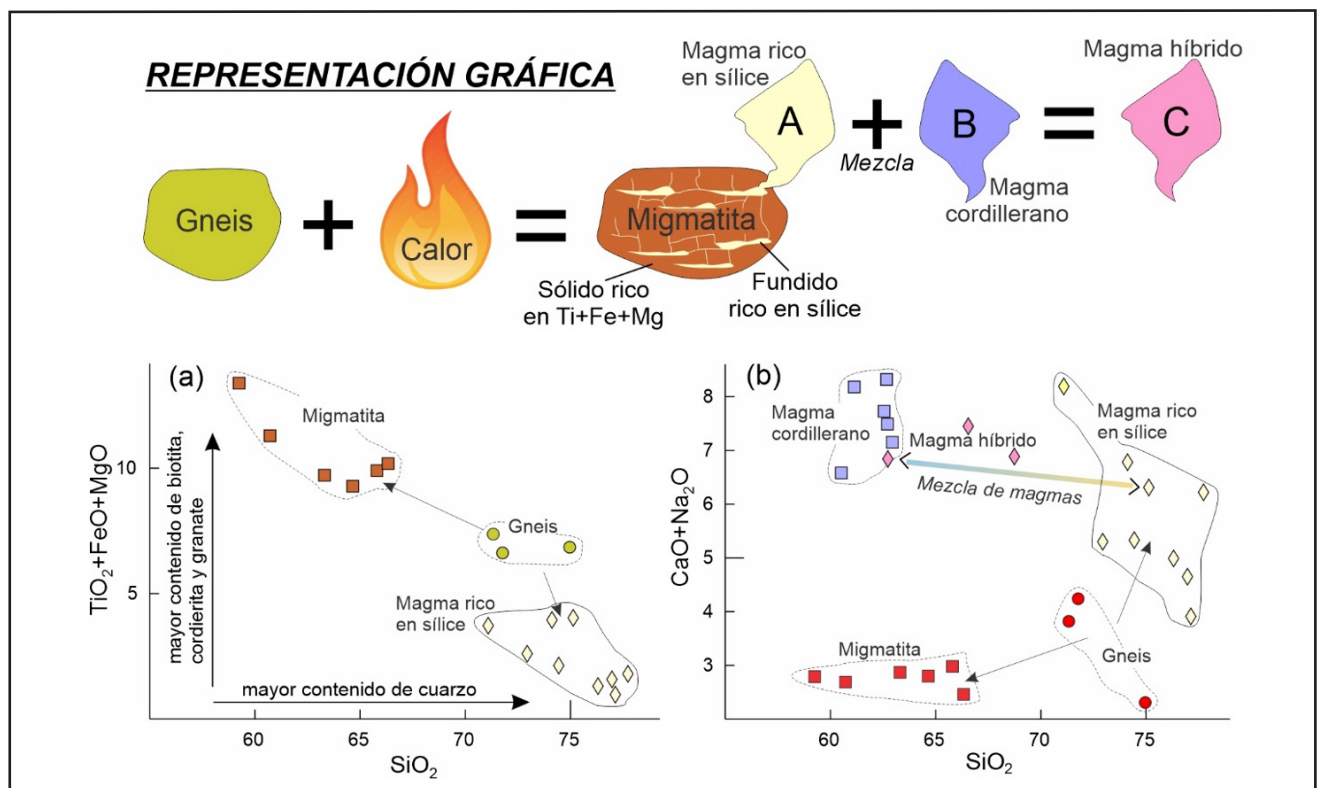


Figura 6: Diagramas de elementos mayoritarios de muestras rocosas de la región del Cerro Toro, junto a una representación gráfica. (a) Óxido de silicio contra la sumatoria de óxidos de titanio, hierro y magnesio, (b) Óxido de silicio contra la sumatoria de óxidos de calcio y sodio. Los valores que se expresan en % en peso pueden consultarse en Alasino et al. (2014). Los magmas híbridos (C), que representan la zona del Cerro Toro, resultan de la mezcla entre el magma rico en sílice (A) y el magma cordillerano (B).

Corteza: Capa externa y sólida de la Tierra, dividida en placas tectónicas.

Corteza oceánica: Capa sólida del fondo marino, más delgada y densa que la corteza continental, compuesta principalmente de basalto.

Corteza continental: Capa sólida menos densa de la Tierra que forma los continentes, con un espesor promedio de 30 a 50 km, compuesta principalmente de granito.

Manto: Capa intermedia de la Tierra, situada entre la corteza y el núcleo, con un espesor de aproximadamente 2.900 km.

Metamorfismo de contacto: Proceso en el que el magma caliente entra en contacto con rocas sólidas, calentándolas y transformándolas sin fundirlas por completo.

Gneis: Roca metamórfica formada a partir de rocas preexistentes que se han transformado por alta presión y temperatura, con una estructura en capas o láminas.

Roca plutónica: Roca que se forma cuando el magma se enfría y solidifica lentamente dentro de la corteza terrestre. Ejemplo común: granito.

Migmatita: Roca que resulta de la fusión parcial de una roca metamórfica creando una mezcla de material sólido y fundido.

Viscosidad: Medida de la resistencia de un fluido al movimiento. Un fluido más viscoso es más espeso y difícil de mover, mientras que uno menos viscoso es más fluido.

Subducción: Proceso geológico donde una placa tectónica oceánica más densa se hunde bajo una placa continental menos densa, causando la formación de magma.

Cámara magmática: Cavity subterránea donde se acumula magma antes de que ascienda hacia la superficie y se enfríe formando rocas graníticas.

Magmatismo cordillerano: magma asociado con la formación de cordilleras montañosas, causado por la interacción de placas tectónicas en un margen de subducción.

■ REFERENCIAS

Alasino P. H., Casquet C., Larrovere M. A., Pankhurst R. J., Galindo C., Dahlquist J. A., Baldo E. G., Rapela C.W. (2014) The evo-

lution of a mid-crustal thermal aureole at Cerro Toro, Sierra de Famatina, NW Argentina. *Lithos* 190/191: 154 – 172

Baker, D. R., Dalpe, C., Poirier, G. (2004) The viscosities of foods as analogs for silicate melts. *Journal of Geoscience Education* 52: 363 – 367,

Callegari, A. B. (2004) Las poblaciones precolombinas que habitaron el sector central del valle de Vinchina entre el 900/950 y 1600/1650 d.c. (Dto. General Lamadrid, La Rioja, Argentina). *Relaciones de la Sociedad Argentina de Antropología XXIX*, Buenos Aires.

Saavedra, J., Pellitero, E., Rossi, J., Toselli, A. (1992) Magmatic evolution of the Cerro Toro granite, a complex Ordovician pluton of Northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Science* 5: 21 – 32,