

Petrografía y composición química de rocas volcánicas: descubrir historias magmáticas

Petrology and geochemistry of volcanic rocks: discovering magma histories

MARCELIANO LAGO¹, CARLOS GALÉ¹, TERESA UBIDE², PATRICIA LARREA³, TOMÁS SANZ¹ Y URBEZ MAJARENA¹

¹ Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza. C/Pedro Cerbuna 12. 50009 Zaragoza.

E-mail: mlag@unizar.es; carlosga@unizar.es; tomassanzserrano@gmail.com; urbezmajarena@hotmail.com

² School of Natural Sciences, Trinity College Dublin. Dublin 2, Irlanda. E-mail: teresa.ubide@tcd.ie

³ Dept. Geology & Environmental Earth Science, Miami University. Culler Hall, Oxford (OH, USA). E-mail: larreap@miamioh.edu

Resumen La petrología ígnea trata de reconstruir la historia magmática de los sistemas volcánicos, desde la formación de los magmas en profundidad, hasta su emplazamiento final. El presente estudio muestra cómo el análisis composicional detallado en minerales, unido a la geoquímica de roca total, es capaz de obtener un conocimiento más profundo de los sistemas volcánicos. La identificación de diferentes poblaciones de cristales y sus condiciones de cristalización permite desentrañar sistemas volcánicos complejos. Además, se constata el papel fundamental que desempeña el estudio petrográfico como base de los estudios petrológicos, permitiendo la correcta interpretación de los procesos magmáticos.

Palabras clave: Historia magmática, geoquímica, petrografía, química mineral, sistema volcánico.

Abstract *Igneous petrology attempts to reconstruct the magmatic history of volcanic systems, since the formation of magmas at depth to their final emplacement. The present study shows that a deeper understanding of volcanic systems may be derived from detailed mineral chemistry in addition to whole rock composition. Identifying different crystal populations and their crystallisation conditions can unravel complex volcanic systems. We highlight that textural analysis is the basis of petrological studies and the correct interpretation of magmatic processes.*

Keywords: *Magma history, geochemistry, petrography, mineral chemistry, volcanic system.*

INTRODUCCIÓN

Los estudios vulcanológicos requieren un enfoque global para que la comprensión detallada de los materiales y procesos volcánicos permita integrar los conocimientos adquiridos en un marco geodinámico y temporal.

La petrología ígnea, al estudiar los productos y los procesos magmáticos, dota a los estudios vulcanológicos de las herramientas necesarias para reconstruir la historia magmática, desde la formación de los fundidos hasta su emplazamiento final, ya sea en la corteza (rocas plutónicas o subvolcánicas) o en la superficie (rocas volcánicas). Para su consecución, considera los recientes avances en el estudio de la composición de rocas ígneas, apoyados en las más modernas metodologías analíticas, junto con un preciso conocimiento de los procesos magmáticos, con el fin de aplicar esta base de co-

nocimientos a diferentes magmatismos ligados a contextos geodinámicos distintos.

Investigaciones y publicaciones recientes sobre procesos magmáticos, aplicando este enfoque (Davidson *et al.*, 2007; Cashman y Sparks, 2013; Ubide *et al.*, 2014a, 2014b), concluyen que los sistemas magmáticos pueden ser más complejos de lo considerado hasta el momento. Así, a través del estudio petrográfico y composicional detallado de las diferentes poblaciones de cristales que contienen los magmas es posible identificar, por ejemplo, procesos complejos de recarga y mezcla de magmas (Ubide *et al.*, 2014a, 2014b) que, a su vez, desencadenan erupciones volcánicas (Kent *et al.*, 2010; Reubi y Blundy, 2007), o modificaciones sustanciales en la composición del magma por la presencia de cristales reciclados (Larrea *et al.*, 2013; Ubide *et al.*, 2012), que nos obligan a re-evaluar las composiciones de roca que se consideran más próximas a la fuente (Sakyi *et al.*, 2012).

En definitiva, el uso de nuevas metodologías para la observación, caracterización y cuantificación de la composición, tanto a escala mineral como del conjunto de la roca, junto con los avances en los estudios sobre el equilibrio mineral-fundido y en modelización cuantitativa, permiten elaborar explicaciones más comprensivas y con mayor nivel de detalle.

Si bien las preguntas fundamentales en la petrología ígnea (el origen del magma, los procesos genéticos involucrados, los mecanismos para el ascenso de los fundidos, los condicionantes del emplazamiento, etc.) permanecen, las investigaciones actuales focalizan su interés en el significado de los procesos magmáticos, siendo éste uno de los cometidos más importantes que la petrogenesis de rocas ígneas demanda.

Más allá de las cuestiones indicadas, con un perfil claramente petrológico o petrogenético, hay una amplia variedad de enfoques de los estudios vulcanológicos: la geoquímica de los gases volcánicos, la geomorfología de edificios y depósitos, las mineralizaciones y, por extensión, el estudio de los yacimientos minerales asociados, los estudios sobre peligrosidad y riesgo volcánico, etc.

CUESTIONES BÁSICAS ANTES DE EMPEZAR

El petrólogo dedicado al estudio de la vulcanología, antes de abordar un caso concreto de estudio se plantea algunas cuestiones básicas: a) qué sabe previamente y dónde puede conseguir más información de partida sobre el problema, b) qué datos hay disponibles y su grado de representatividad, c) qué hipótesis de trabajo existe acerca del problema y su validez actual, d) qué objetivos concretos pretende resolver y, e) qué metodología de trabajo (campo, técnicas de laboratorio, tratamiento de datos, etc.) es la más adecuada para resolver con éxito los objetivos planteados.

Como punto de partida teórico cabe plantearse que existe una relación entre el magmatismo y la tectónica de placas (detalles en López-Ruiz y Cebria, 2015, en este mismo volumen) que se expresa a través de la diferente composición que tienen los magmas generados en los diferentes contextos geodinámicos (Fig. 1).

Esa relación se puede sintetizar, por regla general, a través de tres escenarios composicionales o afinidades magmáticas: toleítico, calco-alcalino y alcalino. Cada uno de esos escenarios básicos tiene una asociación mineral y composición características que, para el caso concreto de los basal-

Fig.1. Principales reservorios del magmatismo, astenosféricos y litosféricos, relacionados con los procesos en la litosfera (continental u oceánica) por la dinámica de la tectónica de placas. Modificado de Lockwood y Hazlett (2010).

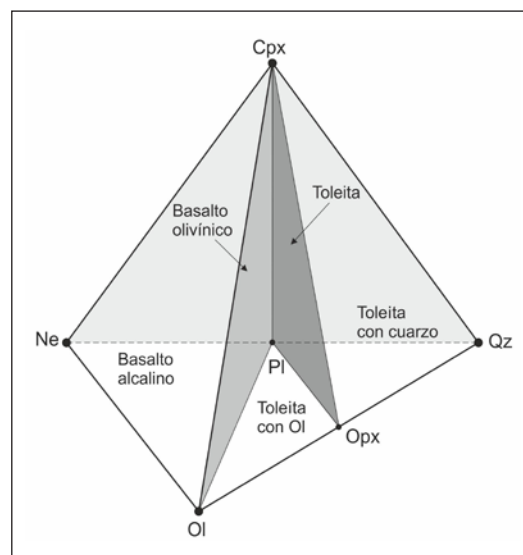
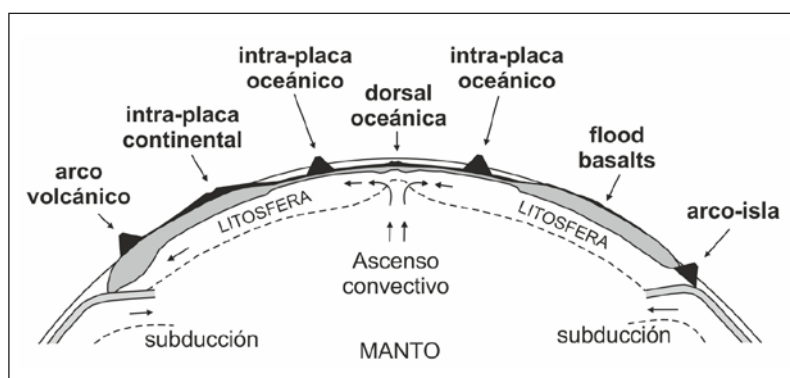


Fig.2. Tetraedro de clasificación de basaltos en función de su composición normativa. Modificado de Yoder y Tilley (1962). Símbolos: Ne: nefelina, Ol: olivino, Pl: plagioclasa, Opx: ortopiroxeno, Cpx: clinopiroxeno y Qz: cuarzo.

tos, se muestra en la figura 2. El esquema de Yoder y Tilley (1962) separa los basaltos toleíticos (con cuarzo, es decir, saturados en SiO_2) de los alcalinos (sin cuarzo, infrasaturados en SiO_2) situándose en una situación intermedia los calco-alcalinos. Para ello considera cuatro componentes minerales principales de los basaltos: olivino, clinopiroxeno, feldespatoideos y cuarzo, y la presencia de otros minerales está determinada por relaciones sencillas entre esos minerales:

$$\begin{aligned} \text{Feldespatoideos (nefelina) + SiO}_2 \text{ (cuarzo)} &> \text{Plagioclasa} \\ \text{Olivino + SiO}_2 \text{ (cuarzo)} &> \text{Ortopiroxeno} \end{aligned}$$

El caso de los plutones granitoideos de diferentes contextos geodinámicos (anorogénicos¹ o no) requiere un estudio específico (Nédélec *et al.*, 2015), al igual que un amplio grupo de rocas particulares (p.e., carbonatitas, anortositas, etc.) que requieren un enfoque diferente.

Cada una de las series magmáticas (alcalina, calco-alcalina y toleítica) tiene una composición propia característica, expresada en su asociación mineral y en sus rasgos geoquímicos particulares, tanto en elementos mayores y traza como a nivel isotópico (Tabla I).

Además del marco teórico de conocimientos acerca del magmatismo en sus diferentes expresiones, el petrólogo ígneo, hoy en día, dispone de muchos recursos a la hora de resolver algunas de las cuestiones básicas planteadas. Así, cada grupo de investigación, departamento universitario, sociedad científica e institución relacionada con la petrología ígnea ofrece numerosa información y difusión de los resultados de la investigación, que complementa a la obtenida por los clásicos sistemas de búsqueda (p.e., consulta de revistas

¹ Magmas cuyo origen no se asocia a fuerzas compresivas propias de contextos de subducción

SERIE	TOLEÍTICA	ALCALINA
Fenocristales	Raro olivino (no zonado), con reabsorción parcial y/o con corona de ortopiroxeno Ortopiroxeno común Clinopiroxeno tipo pigeonita Plagioclasa (An 87-60) Sin xenolitos	Olivino común y zonado Ortopiroxeno ausente Clinopiroxeno rico en Ti Plagioclasa poco común y tardía A veces xenolitos ultramáficos Óxidos ricos en Ti En algunos casos, con alto K, anfíboles alcalinos y/o flogopita
Mesostasia ¹	Sin olivino Clinopiroxeno tipo pigeonita Ortopiroxeno Sin feldespatos alcalinos (o escaso) Vidrio intersticial, y/o cuarzo	Olivino común Clinopiroxeno rico en Ti Sin ortopiroxeno (o escaso) Feldespatos alcalinos intersticiales y/o feldespatoides (p.e., nefelina)
Otros minerales	Anfíbol escaso o raro	Apatito Magnetita rica en Ti
Geoquímica roca total	Hy normativa Rico en Si y Fe Pauta de tierras raras normalizadas con baja pendiente Escaso Ti y P	Ne normativa Rico en Ti, Mg, Na y, a veces, K Pauta de tierras raras normalizadas con elevada pendiente Alto P, Rb, K, Ba

Tabla I. Rasgos composicionales típicos de las series magmáticas alcalina y toleítica.

¹ Último material intersticial formado en una roca ígnea, siempre de pequeño tamaño, pudiendo ser microcristalino o vítreo (vidrio). Término equivalente a matriz.

y manuales especializados, google académico). El acceso online a bases de datos (p.e., Earthref, GeoRoc) y programas de modelización de procesos magmáticos (p.e., MELTS) es habitual en toda investigación petrológica. Otra valiosa fuente de información procede de proyectos internacionales cuyos resultados se expresan en congresos, *workshops*, cursos especializados o libros temáticos (p.e., Canarias, Azores, Hawaii, etc.).

En cuanto a los trabajos de campo, en la actualidad el uso de las metodologías SIG y GPS son imprescindibles en cualquier etapa de cartografía, muestreo, estudio estructural, etc. Una vez establecidas las litologías y, disponible una cartografía en un área volcánica, se realiza un muestreo de roca lo más inalterada posible, representativo a escala espacial y temporal, con registro de cada uno de los materiales lávicos, fragmentarios y/o sedimentarios. Este muestreo comprende también a los posibles nódulos plutónicos (enclaves) identificados, cuyo estudio detallado incluye cartografías particulares con datos de distribución, tamaño, orientación, tipología, relaciones enclave-encajante, etc.

Habitualmente se emplean técnicas extractivas clásicas (maza y cinces), que pueden complementarse con una testificadora portátil según uno o varios diámetros a elegir en el caso de superficies difíciles, de rocas de elevada resistencia o de la necesidad de testificar a diferentes profundidades. También es posible que se requiera el empleo de trincheras, palas, raspadores y brochas en el caso de materiales fragmentarios. Al final, las muestras recogidas serán debidamente sigladas y geo-referenciadas. La cantidad de muestra recogida es una cuestión muy importante, puesto que los volúmenes muestreados serán posteriormente objeto de la elaboración de láminas delgadas para el estudio al microscopio petrográfico (composición y texturas) y el análisis mediante técnicas micro-analíticas (microscopía electrónica de barrido –SEM–, microsonda

electrónica –EPMA– y ablación láser acoplada a la espectrometría de masas con fuente de plasma –LA-ICP-MS). Además, posteriormente se dedicará parte de esas muestras al análisis geoquímico elemental de roca total mediante fluorescencia de rayos X o bien espectroscopía –ICP-OES– (elementos mayores y algunos trazas) y espectrometría de masas con plasma acoplado –ICP-MS– (el resto de los trazas) o análisis de pares isotópicos (Sr, Nd, Pb, etc.) mediante espectrometría de masas con fuente de ionización térmica –TIMS–, o ICP-MS multicolector –MC-ICP-MS– en el caso de separados minerales para datación radiométrica, siendo todas ellas técnicas analíticas destructivas.

RECONSTRUYENDO LA HISTORIA MAGMÁTICA

Si el objetivo del estudio petrológico es reconstruir la historia magmática de un evento o sistema volcánico, desde la generación de los fundidos al emplazamiento de los mismos, cabe plantearse tres preguntas fundamentales: ¿cuál es el origen de los fundidos?, ¿qué procesos magmáticos intervienen? y ¿cuáles son los condicionantes que determinan el emplazamiento final? La forma de abordar estas cuestiones no es única ni lineal, sino que involucra diferentes enfoques y técnicas, según sea el vulcanismo estudiado, la composición de los magmas, el contexto geodinámico, etc.

Independientemente del caso a estudiar, el estudio petrográfico a través de un conjunto de láminas delgadas representativas es fundamental y la base para cualquier estudio posterior. El objetivo fundamental del estudio petrográfico es establecer la asociación mineral propia de cada tipo litológico, caracterizar su textura y establecer la secuencia de cristalización de los distintos componentes minerales. A partir de estas características se pueden clasificar las rocas estudiadas y, tal como se indicaba anteriormente, a partir de su asociación mineral establecer su afinidad o, incluso, anticipar en bue-

na medida su composición geoquímica. También es posible desentrañar la historia magmática de la misma, observando las diferentes poblaciones de cristales e identificando las texturas de equilibrio o disequilibrio, variaciones en las condiciones de cristalización (temperatura, presión, fugacidad de oxígeno, contenido en agua del fundido, etc.) y la presencia de cristales ajenos al evento volcánico (xenocristales, antecristales, etc., que típicamente presentan bordes de reabsorción) o de xenolitos (restos de las rocas encajantes), entre otros. Además, el estudio petrográfico es muy importante porque orienta los futuros análisis composicionales en las distintas fases minerales y permite la selección de las rocas para su análisis geoquímico: nos permite descartar rocas que están alteradas y cuya composición original se ha visto modificada por esta alteración y, también, elegir las rocas más adecuadas para analizar minerales específicos o rocas que den información significativa acerca de la fuente de magma e historia magmática. No es objeto de esta publicación detenerse en los principios sobre la cristalización de rocas ígneas, las relaciones texturales y los criterios de clasificación en rocas volcánicas y subvolcánicas. Dichos aspectos están bien explicados en manuales como el de Castro (2015).

¿Cuál es el origen de los fundidos?

Dar respuesta a cuál es el origen de los fundidos puede ser abordado a través del estudio composicional de la roca total y de sus componentes (cristales en equilibrio). Los contenidos en elementos traza incompatibles y las relaciones de pares isotópicos (Sr, Nd, Pb, Os, y otros) a escala de roca y de mineral permiten aproximar tanto las características de la fuente de los magmas (litosférico vs. astenosférico, enriquecido vs. empobrecido, etc.), como las condiciones de generación de los mismos (tasa de fusión, mineralogía que funde, etc.).

Una forma habitual de responder a esta cuestión es comparar los contenidos en elementos traza incompatibles o en isótopos de las rocas estudiadas con composiciones modelo ampliamente aceptadas por la comunidad científica internacional: de la corteza terrestre, del manto litosférico, del manto astenosférico, de meteoritos que simulan la composición original de la tierra, etc. La similitud con alguna de estas composiciones modelo permite, en muchas ocasiones, que el origen de los fundidos se pueda relacionar con esos modelos: un origen a partir de la fusión de la corteza, de la fusión de manto litosférico, etc.

¿Qué procesos intervienen en el sistema magmático?

Los procesos que intervienen en un sistema magmático pueden ser muy variados. Para identificarlos y caracterizarlos, es habitual combinar dos herramientas: el estudio composicional en minerales y el estudio de la composición geoquímica de roca total.

Estudio composicional en minerales

Los análisis de la composición química de minerales se llevan a cabo habitualmente mediante

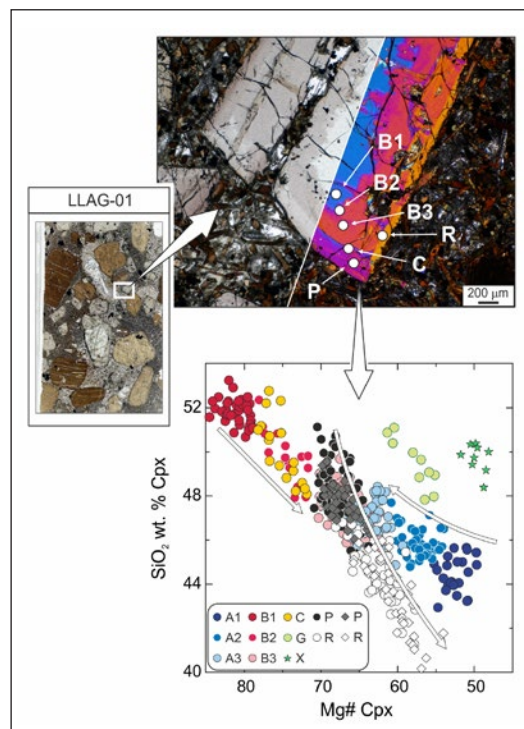


Fig. 3. Identificación de poblaciones de clinopiroxeno en un sistema subvolcánico a partir del estudio detallado petrográfico y composicional. Las flechas indican pautas de evolución composicional magmática. Modificado de Ubide et al. 2014b.

EPMA (o SEM) para el caso de los elementos mayores y LA-ICP-MS en el caso de los elementos traza o isótopos. El estudio detallado de la composición junto con el análisis petrográfico permite identificar poblaciones de cristales en un magma que pueden tener origen distinto y, por lo tanto, derivar de fundidos o eventos diferentes (Fig. 3).

Además, estos cristales pueden responder a condiciones de formación (T , P , fO_2 , pH_2O ...) variables que quedan reflejadas en su composición y señalan su cristalización en profundidades distintas debido al estancamiento de los fundidos en reservorios o cámaras (Fig. 4).

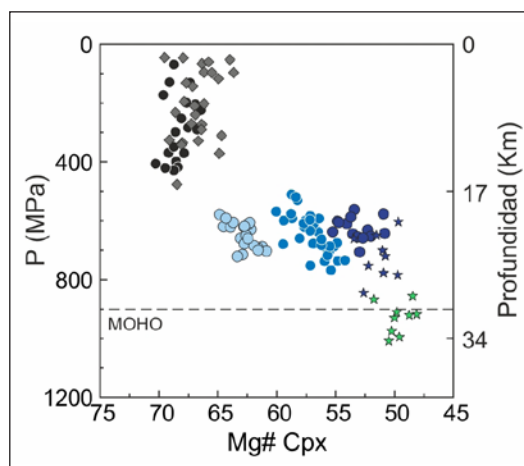


Fig. 4. Profundidades de cristalización del clinopiroxeno calculadas en un sistema subvolcánico. Modificado de Ubide et al. 2014a.

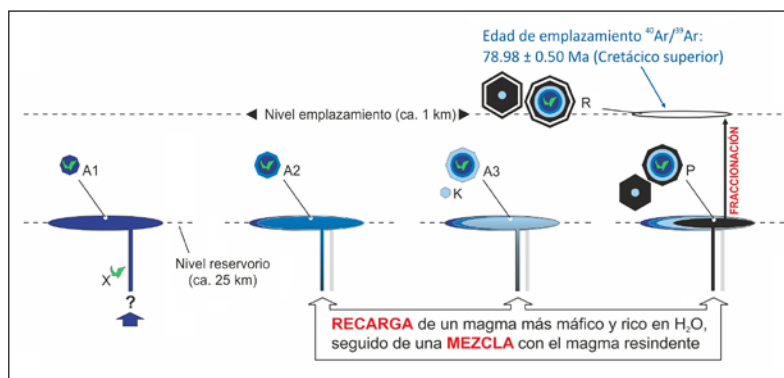
El estudio los equilibrios mineral-fundido y de los zonados en los cristales permite identificar variaciones en las condiciones de los magmas ($X, pH_2O...$) o eventos de recarga por parte de fundidos diferentes (p.e., magmas más primitivos) (Fig. 5).

De igual manera, la velocidad de difusión de ciertos elementos permite establecer tiempos de residencia de los cristales en las cámaras (p.e., Costa *et al.*, 2008). Además, la relación entre fenocristales, microcristales y matriz (o vidrio) evidencia los procesos de fraccionación² que ha sufrido el sistema magmático.

En este sentido, Davidson *et al.* (2007), Larrea *et al.* (2014) y Ubide *et al.* (2014) son buenos ejemplos de cómo el estudio cuantitativo detallado a escala de grano mineral permite la distinción de diferentes poblaciones de cristales integradas en el mismo sistema magmático, que representan fundidos originados en condiciones genéticas muy diferentes (no cogenéticos). Una extensión de estas ideas se aplica al estudio de las fases minerales que constituyen los xenolitos máficos y ultramáficos en Larrea (2014).

Además de los componentes (cristales) principales, las inclusiones fluidas y de fundido son de especial interés en el estudio petrológico puesto que son testigos directos del proceso magmático. Es posible analizar la composición de esas inclusiones y determinar, a través de esa composición, cuáles eran las condiciones del medio en el que se produjo la cristalización del mineral que las engloba.

También tiene especial interés la identificación y análisis de los minerales accesorios, tan importantes como escasos (o ausentes) en rocas indiferenciadas (basaltos), y poco sencillos de determinar en rocas más evolucionadas (andesitas-dacitas). Muchas veces el contenido destacado en algunos elementos traza de la roca (p.e., P, Zr, U,



Th, etc.) está ligado a la presencia de estos minerales accesorios.

Estudio composicional de roca total

La geoquímica de roca total facilita caracterizar la composición elemental (mayores y trazas) e isotópica del evento volcánico estudiado. A partir de ahí, es posible clasificar las diferentes rocas que constituyen la suite volcánica y confirmar su afinidad magmática (Fig. 6), que será necesariamente coherente con la inferida a partir de su asociación mineral y de la composición de sus minerales.

La variación de los elementos mayores y traza con la fraccionación (expresada habitualmente como el % en peso de MgO o en forma del parámetro Mg#) facilita identificar el proceso magmático que condiciona la variabilidad composicional del conjunto de rocas estudiadas, así como la presencia de las composiciones más próximas al fundido original (más primitivas). Estos datos ayudan a formular una hipótesis sobre la evolución magmática del sistema. Los modelos geoquímicos (p.e., software MELTS) permiten verificar esa hipótesis y, desde un punto de vista teórico, informan acerca de las condiciones (T, P, fO_2 , etc.) en las que ha tenido lugar el proceso magmático (Fig. 7).

Al igual que cuando nos preguntamos acerca del origen de los fundidos, también es habitual comparar los contenidos en elementos traza y algunos pares

Fig.5. Esquema sintético de reservorios y eventos de recarga de magma de un sistema subvolcánico. Modificado de Ubide *et al.* 2014a; datación $^{40}Ar/^{39}Ar$ de Ubide *et al.* 2014c.

² Variación de la composición geoquímica de un conjunto de rocas ígneas conforme se produce la cristalización de los minerales que las componen. Esa cristalización sustrae elementos químicos del magma residual de forma que su composición cambia.

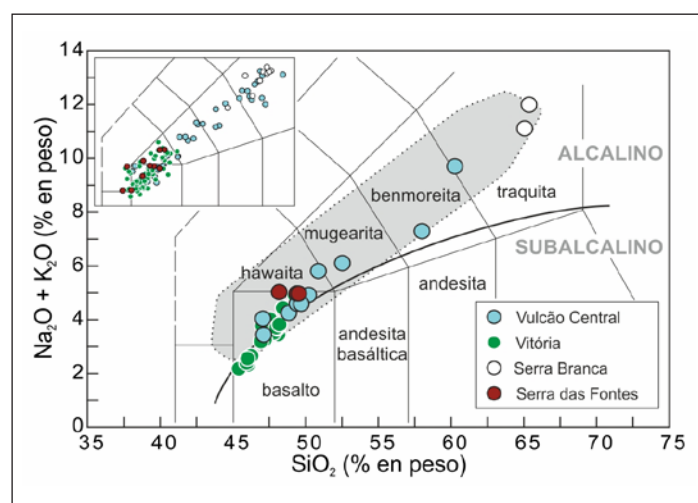


Fig.6. Diagrama TAS de clasificación de rocas representativas del vulcanismo de la isla de Graciosa (Archipiélago de las Azores, Portugal). Modificado de Larrea *et al.* 2014. Datos composicionales de Almeida (2001), Gaspar (1996) y Larrea *et al.* (2014).

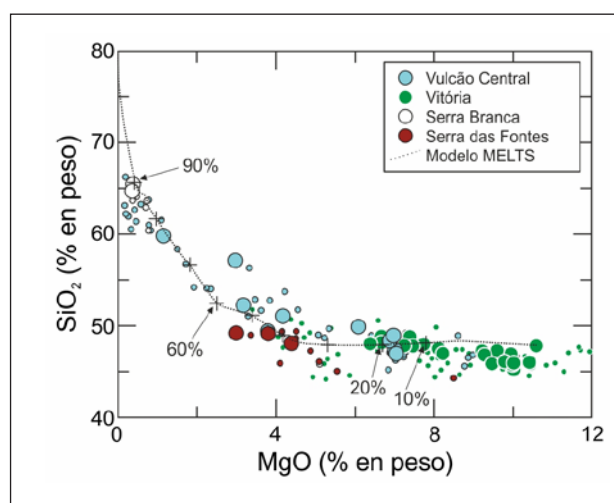


Fig.7. Modelo de evolución magmática elaborado con el software MELTS para representativas del vulcanismo de la isla de Graciosa (Archipiélago de las Azores, Portugal). Modificado de Larrea *et al.* 2014. Datos composicionales de Almeida (2001), Gaspar (1996) y Larrea *et al.* (2014).

isotópicos respecto a rocas modelo. En este caso, las divergencias respecto a la composición modelo del magma original del que derivan las rocas estudiadas, informa sobre procesos específicos (p.e., fusión o fraccionación de un mineral concreto, asimilación de materiales encajantes, etc.) o sobre variaciones en el grado de fusión del material original o de las condiciones en las que tuvo lugar esa fusión.

¿Cuáles son los condicionantes del emplazamiento final de los magmas?

La última etapa de la historia magmática hace referencia al emplazamiento del magmatismo y el momento en que sucede, es decir, su edad geológica. El ascenso y emplazamiento del magma en zonas superficiales dependen del contexto regional y geotectónico en que se encuadra el magmatismo. En este sentido, el análisis estructural y los estudios geofísicos (p.e., tomografía sísmica, ASM, etc.) resultan de gran ayuda puesto que permiten dibujar las morfologías que adopta el magma así como su profundidad, los posibles focos de emisión o de ascenso de fundidos y las direcciones de flujo (p.e., Bolós *et al.*, 2014, Becerril *et al.*, 2013, Gil-Imaz *et al.*, 2006, 2012).

En este contexto, la petrología ígnea guía la selección de las muestras y los métodos adecuados para la datación de los distintos eventos registrados en la historia magmática. La forma más habitual de obtener la edad de un evento volcánico es a través de dataciones radiométricas. Existe una extensa literatura acerca de cuáles son los métodos más apropiados para cada tipo de roca y para diferentes rangos de edad (Vance *et al.*, 2003). Lo más importante es seleccionar los minerales y/o rocas representativas de los diferentes eventos volcánicos identificados para emplearlos en la datación. Así, en función del tipo de rocas de que se trate, es posible que convenga realizar una datación de un conjunto de rocas representativas del evento volcánico para obtener una edad consistente o, por el contrario, sea más adecuado datar separados de minerales que tengan contenidos elevados en los isótopos radioactivos a considerar (p.e., feldespatos ricos en K en rocas alcalinas mesozoicas para su datación mediante $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$; Ubide *et al.* 2014c). También puede ser posible datar diferentes eventos magmáticos, que se reflejan en etapas de crecimiento (zonados) de un mineral. Para ello es posible analizar pares isotópicos en cada zona o banda de crecimiento del mineral (p.e., Pb/Pb en circón; Petrus y Kamber, 2012).

CONSIDERACIONES FINALES

Los estudios petrológicos y geoquímicos de rocas volcánicas persiguen comprender en profundidad los sistemas volcánicos. Las investigaciones actuales hacen especial énfasis en las reconstrucción de historias magmáticas, desde la formación de los fundidos en zonas profundas hasta su emplazamiento final.

El uso de nuevas metodologías para la observación, caracterización y cuantificación de la composición, tanto a escala mineral como del conjunto de la roca, junto con los avances en los estudios

sobre el equilibrio mineral-fundido y en modelización cuantitativa, permiten elaborar explicaciones más comprensivas y con mayor capacidad de generalización.

Este enfoque metodológico actual reclama la importancia de los estudios petrográficos y composicionales de detalle como herramientas básicas de la petrología y geoquímica, pudiendo desentrañar de esta manera sistemas volcánicos que son más complejos de lo que se consideraba hasta el momento.

AGRADECIMIENTOS

Los casos expuestos y la metodología propuesta en el presente trabajo derivan de los resultados obtenidos de los proyectos MICINN CGL2011-27477 y CGL2008-06098.

BIBLIOGRAFÍA

- Almeida, M.H. (2001). *A fonte mantélica na região dos Açores: constrangimentos impostos pelas características geoquímicas de rochas vulcânicas e de xenólitos ultramáficos*. PhD Thesis, Universidade dos Açores, São Miguel.
- Becerril, L., Galindo, I., Gudmundsson, A. y Morales, J.M. (2013). Depth of origin of magma in eruptions. *Scientific Reports*, 3, 2762.
- Bolós, X., Barde-Cabusson, S., Pedrazzi, D., Martí, J., Casas, A., Lovera, R y Nadal-Sala, D. (2014). Geophysical exploration on the subsurface geology of La Garrotxa monogenetic volcanic field (NE Iberian Peninsula). *International Journal of Earth Sciences*, 103, 2255–2269.
- Cashman, K. y Sparks, S. (2013). How volcanoes work: A 25 years perspective. *Geological Society of America Bulletin*, 125 (5/6), 664–690.
- Castro, A. (2015). *Petrografía de Rocas Ígneas y Metamórficas*. Ed. Paraninfo, 260 p.
- Costa, F., Dohmen, R. y Chakraborty, S. (2008). Time scales of magmatic processes from modeling the zoning patterns of crystals, minerals, inclusions and volcanic processes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69, 545–594.
- Davidson, J.P., Morgan, D.J., Charlier, B.L.A., Harlou, R. y Hora, J.M. (2007). Microsampling and Isotopic Analysis of Igneous rocks: implications for the study of magmatic system. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35, 273–311.
- Gaspar, J.L. (1996). *Ilha Graciosa (Açores). História vulcanológica e avaliação do hazard*. Universidade dos Açores, São Miguel.
- Gil-Imaz, A., Lago, M., Galé, C., Pueyo-Anchuela, Ó., Ubide, T., Tierz, P. y Oliva-Urcia, B. (2012). The Permian mafic dyke swarm of the Panticosa pluton (Pyrenean Axial Zone, Spain): Simultaneous emplacement with the late-Variscan extension. *Journal of Structural Geology*, 42, 171–183.
- Gil-Imaz, A., Pocovi, A., Lago, M., Galé, C., Arranz, E., Rillo, C. y Guerrero, E. (2006). Magma flow and thermal contraction fabric in tabular intrusions inferred from AMS analysis. A case study in a late-Variscan folded sill of the Albarracín Massif (southeastern Iberian Chain, Spain). *Journal of Structural Geology*, 28(4), 641–653.
- Kent, A.J., Darr, C., Koleszar, A.M., Salisbury, M.J. y Cooper, K.M. (2010). Preferential eruption of andesitic magmas through recharge filtering. *Nature Geoscience*, 3(9), 631–636.
- Larrea, P., França, Z., Lago, M., Widom, E., Galé, C. y Ubide, T. (2013). Magmatic Processes and the Role of Ante-

crysts in the Genesis of Corvo Island (Azores Archipelago, Portugal). *Journal of Petrology*, 54(4), 769-793.

Larrea, P. (2014). *The magmatic evolution of Graciosa and Corvo oceanic islands, Azores Archipelago*. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza. 209 p.

Larrea, P., Galé, C., Ubide, T., Widom, E., Lago, M. y França, Z. (2014). Magmatic Evolution of Graciosa (Azores, Portugal). *Journal of Petrology*, 55(11), 2125-2154.

Lockwood, J.P. y Hazlett, R. (2010). *Volcanoes: global perspectives*. Ed. Blackwell Publishing, 539 p.

López-Ruiz, J. y Cebriá, J.M. (2015). Volcanismo y tectónica de Placas. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*,

Nédélec, A., Bouchez, J.L. y Bowden, P. (2015). *Granites: petrology, structure, geological setting and metallogeny*. Ed. Oxford University Press, 352 p.

Petrus, J.A. y Kamber, B.S. (2012). VizualAge: A Novel Approach to Laser Ablation ICP-MS U-Pb Geochronology Data Reduction. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 36(3), 247-270.

Reubi, O. y Blundy, J. (2007). A dearth of intermediate melts at subduction zone volcanoes and the petrogenesis of arc andesites. *Nature*, 461, 1269-1273.

Sakyi, P.A., Tanaka, R., Kobayashi, K. y Nakamura, E. (2012). Inherited Pb isotopic records in olivine antecryst-hosted melt inclusions from Hawaiian lavas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 95, 169-195.

Ubide, T., Arranz, E., Lago, M., Galé, C. y Larrea, P. (2012). The influence of crystal settling on the compositional

zoning of a thin lamprophyre sill: A multi-method approach. *Lithos*, 132-133, 37-49.

Ubide, T., Galé, C., Arranz, E., Lago, M. y Larrea, P. (2014a). Clinopyroxene and amphibole crystal populations in a lamprophyre sill from the Catalanian Coastal Ranges (NE Spain): A record of magma history and a window to mineral-melt partitioning. *Lithos*, 184-187, 225-242.

Ubide, T., Galé, C., Larrea, P., Arranz, E., y Lago, M. (2014b). Antecrysts and their effect on rock compositions: The Cretaceous lamprophyre suite in the Catalanian Coastal Ranges (NE Spain). *Lithos*, 206-207, 214-233.

Ubide, T., Wijbrans, J.R., Galé, C., Arranz, E., Lago, M. y Larrea, P. (2014c). Age of the Cretaceous alkaline magmatism in northeast Iberia: Implications for the Alpine cycle in the Pyrenees. *Tectonics*, 33(7), 1444-1460.

Vance, D., Müller, W. y Villa, I.M. (Eds.) (2003). *Geochronology: Linking the Isotopic Record with Petrology and Textures*. Geological Society London Special publication, 220 p.

Yoder, H.S. y Tilley, C.E. (1962). Origin of basalt magmas; an experimental study of natural and synthetic rock systems. *Journal of Petrology*, 3(3), 342-529. ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 29 de julio de 2014 y aceptado definitivamente para su publicación el 12 de febrero de 2015.