

# Petrografía y química mineral de los enclaves de granulitas del volcán de La Encomienda (Campo Volcánico de Calatrava)

*Petrography and mineral chemistry of granulite enclaves from the La Encomienda volcano (Calatrava Volcanic Field)*

David Orejana<sup>1</sup>, María García-Rodríguez<sup>1</sup> y Carlos Villaseca<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Mineralogía y Petrología (Universidad Complutense de Madrid). C/ José Antonio Novais 12, 28040, Madrid; [dorejana@ucm.es](mailto:dorejana@ucm.es); [magarc40@ucm.es](mailto:magarc40@ucm.es); [granito@ucm.es](mailto:granito@ucm.es)

## ABSTRACT

The granulite xenoliths from the La Encomienda volcano (Calatrava Volcanic Field) represent a felsic peraluminous suite. Mineral chemistry allows estimating temperature and pressure conditions in the range of 883-889 °C and 0.76-0.84 GPa, in accordance with a lower crustal derivation (25-28 km). These enclaves are charnockitic, metasedimentary and metagranitic granulites. Their petrography and mineral chemistry indicate an igneous (intermediate-acid composition) or sedimentary origin for the protoliths. When comparing with granulite xenoliths from the Spanish Central System (SCS), it is apparent that Calatrava granulites did not attain the ultra-high temperature conditions characteristic of the SCS xenoliths, although both regions point to a mainly felsic nature of the lower crust under the Central Iberian Zone.

**Key-words:** Felsic granulites, Calatrava Volcanic Field, Lower crust, Mineral chemistry.

Geogaceta, 73 (2023), 67-70  
<https://doi.org/10.55407/geogaceta95437>  
 ISSN (versión impresa): 0213-683X  
 ISSN (Internet): 2173-6545

## Introducción

En la Zona Centro Ibérica (Macizo Ibérico) se han encontrado xenolitos corticales de origen profundo en dos áreas: el Sistema Central Español (SCE) y el Campo Volcánico de Calatrava (CVC). Estos xenolitos se encuentran incluidos en magmas máficos o ultramáficos de afinidad alcalina y edad Pérmico (SCE) o Plioceno-Pleistoceno (CVC). Su tipología y composición es muy heterogénea, pero fundamentalmente félsica. Se han reconocido granulitas metapelíticas y metaígneas félsicas, charnockitas y, más raramente, términos gabroideos en sentido amplio (e.g., Villaseca et al., 1999, 2007b; Orejana et al., 2006; Puelles et al., 2019). El estudio de los enclaves de granulitas es fundamental para conocer la naturaleza y composición de la corteza inferior bajo terrenos cratónicos, establecer los mecanismos de crecimiento de la corteza y determinar la evolución de secciones litosféricas.

El objetivo de este trabajo es presentar datos de un nuevo muestreo de

xenolitos de granulitas del volcán de la Encomienda (CVC), haciendo énfasis especialmente en la petrografía y la química de elementos mayores y traza de minerales principales y algunos accesorios.

## Contexto geológico

El Campo Volcánico de Calatrava (Ciudad Real) está formado por más de 250 edificios volcánicos monogenéticos de edad Cenozoica (Fig. 1). Este vulcanismo está asociado con magmas de composición basáltica alcalina, basanítica, melilitítica y nefelinítica (Ancochea, 1982), que terminan conformando depósitos piroclásticos y coladas de lava que atraviesan un basamento Ordovícico-Silúrico compuesto de rocas metamórficas de bajo grado. En algunos depósitos piroclásticos se encuentran enclaves peridotíticos y piroxeníticos (e.g., Ancochea y Nixon, 1987; Villaseca et al., 2010).

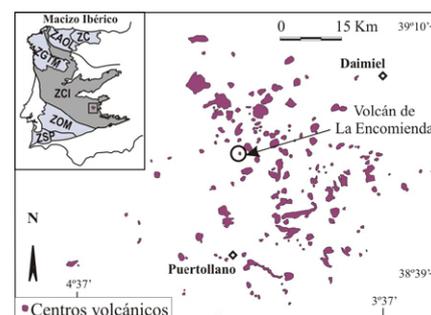
No es frecuente la presencia de xenolitos granulíticos en los volcanes de Calatrava, pero en el complejo volcánico de La

## RESUMEN

Los xenolitos granulíticos del volcán de La Encomienda (Campo Volcánico de Calatrava) representan un conjunto de composición félsica peraluminica. Su química mineral permite estimar condiciones de temperatura y presión en torno a los 883-889 °C y 0.76-0.84 GPa, lo que implica profundidades propias de la corteza inferior (25-28 km). Se trata de granulitas de tipo charnockítico, metasedimentario y metagranítico. Su petrografía y química mineral indican que sus protolitos son de origen ígneo (composición intermedia-ácida) y/o sedimentario. Al comparar con xenolitos granulíticos del Sistema Central Español (SCE), queda de manifiesto que en Calatrava no se llegan a alcanzar las condiciones de ultra-alta temperatura que sí se logran en el SCE, así como el marcado carácter félsico de la corteza inferior bajo la Zona Centro-Ibérica.

**Palabras clave:** Granulitas félsicas, Campo Volcánico de Calatrava, Corteza inferior, Química mineral.

Fecha de recepción: 06/07/2022  
 Fecha de revisión: 28/10/2022  
 Fecha de aceptación: 02/12/2022



**Fig. 1.- Esquema geológico del Campo Volcánico de Calatrava y su posición en la Zona Centro-Ibérica (recuadro).**

Fig. 1.- Geological sketch map of the Calatrava Volcanic Region and location within the Central Iberian Zone (inset).

Encomienda aparece un cono de escorias donde hay xenolitos corticales que fueron descritos por vez primera por Puelles et al. (2019), clasificándolos en tres tipos: 1) metanoritas y metanortositas, 2) granulitas félsicas aluminicas y 3) granulitas félsicas. Este estudio se centró en obtener edades U-Pb en circón y en describir e interpretar la fábrica de deformación de los enclaves. Con estos datos, Puelles et al. (2019) establecen una edad de cristalización de

309 Ma para los xenolitos de metanoritas, mientras que las granulitas aluminicas muestran un pico granulítico hacia los 288 Ma y un conjunto de edades dispersas entre 350 y 600 Ma.

En la Península Ibérica no abundan los xenolitos de la corteza inferior. Existe información más o menos detallada de los xenolitos del Sistema Central Español (Villaseca et al., 1999, 2007b; Orejana et al., 2006) y los volcanes cenozoicos de Tallante (Bianchini et al., 2015) y Cofrentes (García-Rodríguez et al., 2022). Estos trabajos muestran una heterogeneidad de litologías granulíticas, predominando ampliamente los términos intermedios y ácidos, todos ellos félsicos.

### Petrografía

Se han estudiado ocho xenolitos cuyo tamaño es variable, transitando entre 4 y 14 cm. Presentan forma con tendencia elongada y sus contactos con la roca volcánica son netos, rectos o irregulares. En algunos de ellos se han reconocido texturas reaccionales e infiltración del fundido volcánico, que ocasionan el crecimiento secundario de calcita y ceolitas.

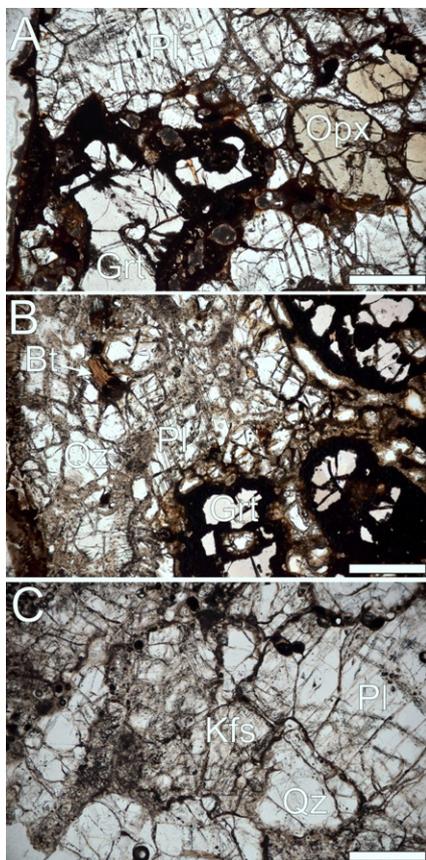
Todas las granulitas muestradas son félsicas (< 30% minerales máficos). Pueden agruparse en tres tipos de acuerdo con su mineralogía: tipo I) granulitas charnockíticas (equivalentes a las metanoritas y metanortositas de Puelles et al., 2019), tipo II) granulitas metasedimentarias con granate (equivalentes a las granulitas félsicas y aluminicas de Puelles et al., 2019), y tipo III) granulitas hololeucocráticas metagraníticas.

Las granulitas charnockíticas poseen textura inequigranular granoblástica de tamaño de grano fino a medio (Fig. 2A), con un bandeo en el que alterna un dominio feldespático con otro rico en granate y ortopiroxeno. Los minerales principales son plagioclasa (67-70%), ortopiroxeno (21-25%), granate (0-7%) y biotita (0-8%). El granate presenta en ocasiones coronas kelfíticas. Los principales minerales accesorios son cuarzo, apatito, rutilo, ilmenita, magnetita, circón y monacita.

Las granulitas metasedimentarias con granate poseen textura inequigranular granoblástica de grano medio y bandeo con dominios cuarzo-feldespáticos y otros ricos en granate (Fig. 2B). Los minerales principales son plagioclasa (27-45%), feldespato potásico (14-40%), cuarzo (20-28%) y granate (8-20%), éste

último a veces con coronas kelfíticas asociadas. En proporciones accesorias pueden aparecer biotita/flogopita, sillimanita, apatito, rutilo y circón.

Los xenolitos más leucocráticos, o metagranitos, muestran una textura inequigranular de tamaño de grano medio a fino (Fig. 2C), en la que no se desarrolla por completo una textura granoblástica. Los minerales principales son plagioclasa (24-74%), feldespato potásico (5-50%), cuarzo (12-25%) y biotita (1-5%). El feldespato potásico es intersticial en la mayoría de los casos, pero ocasionalmente forma grandes cristales de hasta 1.5 cm de tamaño, intercreciendo con cuarzo. Los minerales accesorios más importantes son apatito y circón.



**Fig. 2.-** Imágenes de microscopio petrográfico de los xenolitos de Calatrava. A: Charnockita; B: granulita con granate; C: metagranito. Opx: ortopiroxeno, Grt: granate, Pl: plagioclasa, Kfs: feldespato potásico, Qz: cuarzo, Bt: biotita-flogopita. Barra blanca: 1 mm.

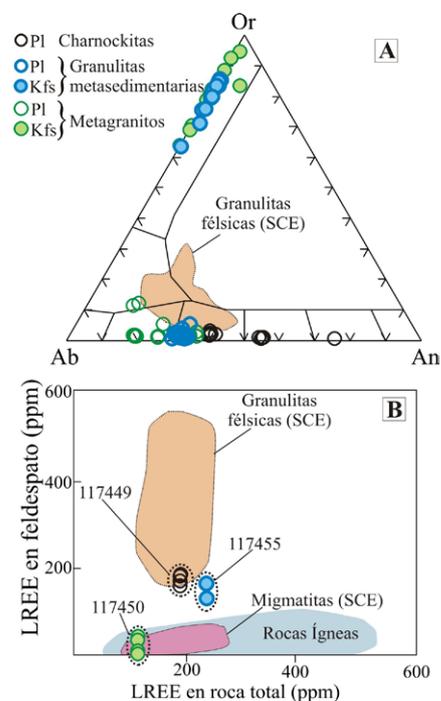
*Fig. 2.- Plane-polarised images of Calatrava xenoliths. A: Charnockite; B: garnet granulite; C: metagranite. Opx: orthopyroxene; Grt: garnet; Pl: plagioclase; Kfs: K feldspar; Qz: quartz; Bt: biotite-flogopite. White bar: 1 mm.*

### Química mineral

Los datos de química mineral se han obtenido mediante la microsonda electrónica modelo JEOL JZA-8900 M del

Centro Nacional de Microscopía Electrónica (Universidad Complutense de Madrid) (elementos mayores) y con Ablación Láser acoplada a un espectrómetro de masas (LA-ICP-MS) en el Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (IACT) (elementos traza).

La plagioclasa (tanto núcleos como bordes minerales) de las charnockitas posee los contenidos más altos en CaO (An<sub>75</sub>), aunque la mayor parte de los datos llevan a una clasificación de labradorita-andesina (An<sub>39-55</sub>) (Fig. 3A). En los otros dos tipos de xenolitos la plagioclasa muestra una composición similar más rica en Na (An<sub>13-36</sub>). Los valores de ortosa son bajos en los tres tipos de enclaves. Las concentraciones de Sr (780–875 ppm) y Ba (75–131 ppm) son mayores en las plagioclasas de las charnockitas. El feldespato potásico de las granulitas con granate y los metagranitos posee una composición similar, de tipo sanidina (Or<sub>63-95</sub>). Las concentraciones de Sr, Ba, Pb y LREE, sin embargo, son mucho mayores en las granulitas félsicas con granate que en los metagranitos, pese a que las REE muestran patrones normalizados fraccionados y con anomalía positiva de Eu en todos los casos. Destacan los valores relativamente altos de LREE en los

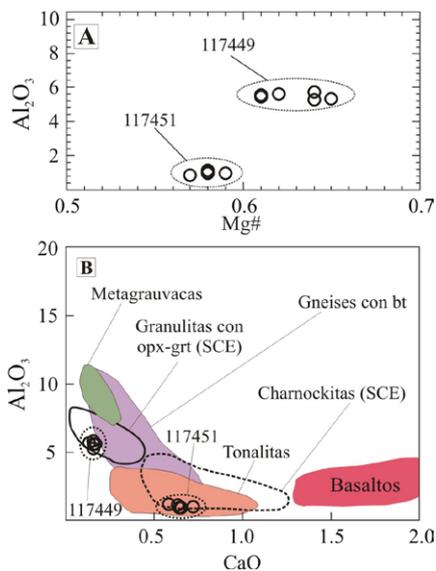


**Fig. 3.-** Composición química de los feldspatos. Clasificación (A) y LREE en feldspatos vs. LREE en la roca total (B). Los campos del SCE están sacados de Villaseca et al. (1999, 2007a). Ver figura en color en la web.

*Fig. 3.- Chemical composition of feldspar. Classification (A) and LREE in feldspar vs LREE in the whole-rock (B). SCE fields after Villaseca et al. (1999, 2007a). See color figure in the web.*

feldespatos de los xenolitos de tipo I y II (LREE = 128-179 ppm; Fig. 3B). No obstante, son concentraciones marcadamente más bajas en LREE que las de los feldespatos granulíticos de los xenolitos de corteza inferior del SCS (Fig. 3B).

El ortopiroxeno, que solo está presente en las granulitas charnockíticas, es de composición heterogénea, con valores moderados de Mg# (En<sub>54-65</sub>) que se correlacionan positivamente con Al (Fig. 4A) y Ti, y negativamente con Si, Ca y Mn. Los valores de Ca y Al son similares a los de opx restílicos de experimentos de fusión de rocas de composición intermedia (Fig. 4B). Los contenidos en elementos traza son moderados para los metales de transición como V (hasta 812–902 ppm) y Cr (hasta 200–489 ppm) y bajos para el resto de elementos.



**Fig. 4.- Composición química de los ortopiroxenos. Los campos rellenos representan fundidos experimentales. Los datos del SCE y las referencias de los experimentos de fusión pueden encontrarse en Villaseca et al. (2007b).**

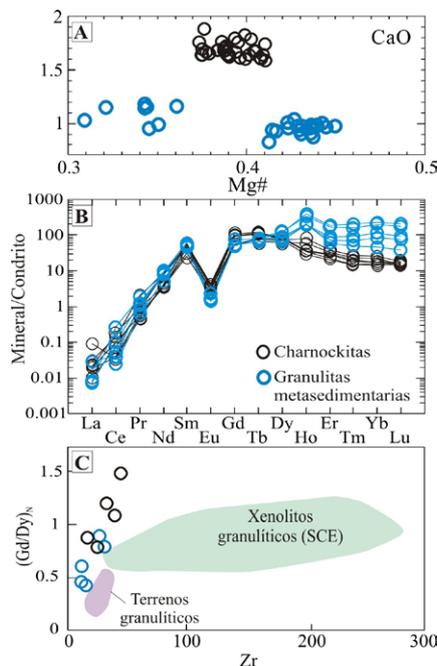
*Fig. 4.- Chemical composition of orthopyroxene. Filled fields represent melts from experiments. See SCE data and references related to melting experiments in Villaseca et al. (2007b).*

Los granates son de la serie almandino-piropo (Py<sub>30-44</sub>). Su variación composicional se restringe al Mg# y el contenido de CaO, siendo éste mayor en los xenolitos de charnockitas que en los más peraluminicos (Fig. 5A). Las concentraciones de elementos traza son bajas para la mayoría de los elementos, con la excepción de algunos metales de transición (e.g., Co, V, Cr), Zr, Y y las HREE. Los patrones de REE normalizados al condrito muestran abundancias bajas en LREE, anomalía negativa de Eu y contenidos variables de HREE, con espectros planos

en las granulitas metasedimentarias y de pendiente negativa (Dy-Lu) en las granulitas charnockíticas (Fig. 5B). Las relaciones (Gd/Dy)<sub>N</sub> son similares a las de granates de granulitas del SCE, pero estos últimos destacan por concentraciones mucho mayores de Zr (Fig. 5C).

La biotita está presente en todos los tipos de enclaves, mientras que flogopita solamente se ha observado en una de las granulitas félsicas metasedimentarias. En su conjunto, su composición es heterogénea, aunque no varíe excesivamente dentro de cada enclave. El Mg# transita entre 0.51 y 0.78, observándose una tendencia a aumentar los contenidos de Al (Fig. 6A) y K en los términos más evolucionados, que a su vez se empobrecen en Si, Na y F. El TiO<sub>2</sub> posee valores mayoritariamente por debajo de los de flogopitas de xenolitos del SCE (Fig. 6A). La concentración de la mayoría de elementos traza (Rb, Sr, Pb, Nb, Ta, Y, Sc, Co, Ni and REE) es mucho mayor en los enclaves metagraníticos en comparación con las granulitas metasedimentarias (Fig. 6B).

Debido al alto grado de transformación de algunos cristales de rutilo, solo se ha podido determinar la composición de elementos traza de los rutilos en una granulita metasedimentaria, siendo relevantes los valores de Zr (710-3900 ppm) por su utilidad en termometría.



**Fig. 5. Composición química de los granates. El Condrito usado ha sido el de Sun y McDonough (1989). Datos de xenolitos del SCE de Villaseca et al. (2007a) y Orejana et al. (2011).**

*Fig. 5.- Chemical composition of garnet. Chondrite values after Sun and McDonough (1989). Data from SCE granulitic xenoliths after Villaseca et al. (2007a) and Orejana et al. (2011).*

### Geotermobarometría

Se han realizado cálculos termobarométricos clásicos basados en la química mineral, con la intención de determinar las condiciones de equilibrio P-T del pico metamórfico. Para ello se ha empleado la hoja de cálculo GPT elaborada por Reche y Martínez (1996), en la que se compilan diversos métodos de cálculo. Los xenolitos metagraníticos y uno de los charnockíticos no poseen una mineralogía apropiada y, por lo tanto, no han aportado resultados. Los valores obtenidos para el resto de xenolitos se muestran en la Tabla I.

Enclave	T <sup>1</sup>	T <sup>2</sup>	T <sup>3</sup>	P <sup>1</sup>	P <sup>2</sup>
117449	889	-	-	-	0.84
117453	-	770	-	0.82	-
117454	-	1061	-	0.79	-
117455	-	795	862	0.76	-

**Tabla I.- Valores promedio de temperatura (°C) y presión (GPa) obtenidos para los xenolitos granulíticos de Calatrava. La temperatura corresponde con el equilibrio opx-grt (T1), grt-bt (T2) y Zr-en-rutilo (T3; Ferry y Watson, 2007). Las presiones corresponden con el barómetro GASP (P1) y grt-opx (P2). Ver referencias de T1, T2, P1 y P2 en Reche y Martínez (1996).**

*Table I.- Averaged temperature and pressure obtained for the Calatrava granulites. Temperature calculated according to mineral equilibria: opx-grt (T1), grt-bt (T2) and Zr-in-rutile (T3; Ferry and Watson, 2007). Pressure calculated for the GASP barometer (P1) and grt-opx equilibria (P2). See references regarding T1, T2, P1 and P2 in Reche and Martínez (1996).*

Las temperaturas son variables, pero considerando los valores medios dentro de un mismo grupo de xenolito (es el caso de las granulitas metasedimentarias), el rango obtenido es muy estrecho (883-889 °C). En el caso de las presiones ocurriría algo parecido, con presiones entre 0.76 y 0.84 GPa, que equivaldrían, aproximadamente, a 25-28 km de profundidad.

Estos resultados indican condiciones de metamorfismo de alta temperatura en facies de granulitas y presiones propias de la corteza inferior.

### Discusión y conclusiones

La naturaleza charnockítica del primer tipo de enclaves estudiados implica que el protolito corresponde con una roca ígnea (e.g., Frost y Frost, 2008). La composición relativamente rica en molécula de An de la plagioclasa y los valores moderados de Mg# del ortopiroxeno sugieren que

la composición del magma original probablemente era intermedia, pese a que el metamorfismo en facies granulita haya retocado la química mineral original. Los contenidos de CaO y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de los ortopiroxenos de estos enclaves son similares a los que muestran granulitas equivalentes (charnockitas) del Sistema Central Español y los ortopiroxenos formados en experimentos de fusión a partir de ortogneises biotíticos y tonalitas (Fig. 4B). Estos datos apoyan la composición intermedia de la roca original y su posible naturaleza restítica (e.g., Villaseca et al., 2007b).

Por su composición mineral (minerales félsicos ≥ 95 vol.%) y su textura, también se puede proponer un protolito ígneo (metagranito) para las granulitas más félsicas de tipo III. Los valores relativamente evolucionados que muestra la composición química de la plagioclasa y la biotita, estarían de acuerdo con esta posibilidad (Figs. 3 y 6).

Sin embargo, la naturaleza de las granulitas con granate (tipo II) no parece ígnea. La presencia de sillimanita accesoria, su carácter más peraluminico y la asociación en afloramiento de estos xenolitos con otros mucho más ricos en granate + sillimanita (claramente metapelíticos) (Puelles et al., 2019), permite suponer un origen sedimentario samítico para el protolito.

Las estimaciones de temperatura obtenidas, en el rango medio de 883-889 °C, hace posible haber alcanzado condiciones de fusión parcial. Un rasgo químico que apunta en esta dirección es la variación composicional de HREE que muestran los granates de las charnockitas y las granulitas metasedimentarias, cuyos patrones tienden a tener una forma plana o con un ligero empobrecimiento en las REE más pesadas, desde el Dy al Lu (Fig. 5B). Esta característica, que ya se ha descrito en xenolitos de granulitas del SCE (Villaseca et al., 2007a; Orejana et al., 2011), se ha asociado con un comportamiento compatible de dichos elementos y su lenta difusión durante el crecimiento del granate metamórfico en equilibrio con un fundido (Otamendi et al., 2002). El metamorfismo granulítico en condiciones de anatexia refuerza la idea de que la corteza inferior en el centro de España posee una naturaleza restítica (Villaseca et al., 1999, 2007b; Orejana et al., 2011).

Al comparar los xenolitos granulíticos de Calatrava con los estudiados previamente en el SCE, queda patente la naturaleza mayoritariamente félsica de las rocas de la corteza inferior en el centro peninsular. No obstante, se pueden establecer

algunas diferencias significativas entre ambos sectores, como la mayor abundancia relativa de términos charnockíticos y metasedimentarios en Calatrava (20% y 60%, respectivamente), frente al SCE, donde no superan el 1% o el 10% (Villaseca et al., 2007b), o las condiciones de ultra-alta temperatura y mayor presión registradas en el SCE (T=960-1060 °C; P=0.7-1.1 GPa; Villaseca et al., 1999; Orejana et al., 2011). Estas condiciones más extremas quedan reflejadas en ciertos rasgos de la química mineral de los xenolitos del SCE, como es el elevado contenido de la plagioclasa en molécula de Or (Fig. 3A), las altas concentraciones de LREE de los feldespatos granulíticos (Fig. 3B), los mayores contenidos de Zr en los granates (Fig. 5C) y la presencia de flogopita residual muy rica en Ti (Fig. 6A). En todos estos casos, la química mineral de las granulitas de Calatrava indicaría condiciones de menor temperatura.

### Contribución de los autores

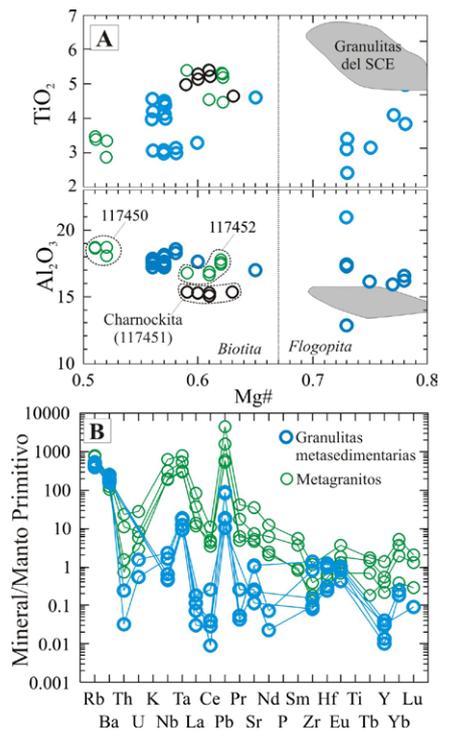
Todos los autores han participado en las distintas tareas realizadas: estructura del trabajo, metodología, adquisición y cálculo de los datos, elaboración de figuras y tablas y discusión de resultados.

### Agradecimientos y financiación

Este estudio ha sido financiado por el proyecto PID2020-115980GB-I00 del Ministerio de Ciencia e Innovación de España. Agradecemos la ayuda de Alfredo Fernández Larios para la adquisición de los datos de microsonda electrónica, y la de Javier García Serrano y Manuel Alpiste para la realización de análisis con LA-ICP-MS. El trabajo se ha beneficiado de la revisión constructiva de tres revisores anónimos.

### Referencias

Ancochea, E. (1982). *Evolución Espacial y Temporal del Volcanismo Reciente de España Central*. Ph.D. thesis, Univ. Complutense de Madrid.  
 Ancochea, E. y Nixon, P.H. (1987). En: *Mantle Xenoliths* (Nixon, P.H., Ed.). Wiley, Chichester, 119-124.  
 Bianchini, G., Braga, R., Langone, A., Natali, C. y Tiepolo, M. (2015). *Lithos* 220-223, 191-199.  
 Ferry, J.M. y Watson, E.B. (2007). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 154, 429-437.  
 Frost, B.R. y Frost, C.D. (2008). *Gondwana Research* 13, 30-44.



**Fig. 6. Composición química de las biotitas-flogopitas. Campo de flogopitas de granulitas del SCE según Villaseca et al. (1999). El Manto Primitivo usado ha sido el de McDonough y Sun (1995). Ver figura en color en la web.**

Fig. 6.- Chemical composition of mica. The field of SCE granulitic phlogopite is after Villaseca et al. (1999). Chondrite values after Sun and McDonough (1989). See color figure in the web.

García-Rodríguez, M., Orejana, D., de Ignacio, C. (2022). *Geogaceta* 72 (in press).  
 McDonough, W.F. y Sun, S.S. (1995). *Chemical Geology* 120, 223-253.  
 Orejana, D., Villaseca, C. y Paterson, B.A. (2006). *Lithos* 86, 167-196.  
 Orejana, D., Villaseca, C., Armstrong, R.A., Jeffries, T.E. (2011). *Lithos* 124, 103-116.  
 Otamendi, J.E., De la Rosa, J., Patiño-Douce, A.E. y Castro, A. (2002). *Geology* 30, 159-162.  
 Puelles, P., Gil Iburguchi, J.I., García de Madinabeitia, S., Sarrionandia, F., Carracedo-Sánchez, M. y Fernández-Armas, F. (2019). *Lithos* 342-343, 114-134.  
 Reche, J. y Martínez, F.J. (1996). *Computers and Geosciences* 22, 775-784.  
 Sun, S.S. y McDonough, W.F. (1989). Geological Society Special Publication 42, 313-345.  
 Villaseca, C., Downes, H., Pin, C. y Barbero, L. (1999). *Journal of Petrology* 40, 1465-1496.  
 Villaseca, C., Orejana, D. y Paterson, B.A. (2007a). *Lithos* 96, 375-386.  
 Villaseca, C., Orejana, D., Paterson, B.A., Billström, K. y Pérez-Soba, C. (2007b). *European Journal of Mineralogy* 19, 463-477.  
 Villaseca, C., Ancochea, E., Orejana, D. y Jeffries, T.E. (2010). Geological Society Special Publication 337, 125-151.