

# Pirometamorfismo en xenolitos calcosilicatados de la unidad piroclástica comendítica de Monte Ulmus, SO de Cerdeña, Italia: caracterización mineralógica e isotópica

*Pyrometamorphism in calc-silicate xenoliths of the Monte Ulmus pyroclastic comenditic unit, SW Sardinia, Italy: mineralogical and isotopic characterization*

Ariana Carrazana<sup>1</sup>, Daniela Novembre<sup>2</sup> y Domingo Gimeno<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departament de Mineralogia, Petrologia i Geoquímica Aplicada, Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona. Martí i Franquès s/n, 08028, Barcelona, España  
ariana.carrazaba@ub.edu, domingo.gimeno@ub.edu

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria e Geologia, Università Degli Studi Gabriele D'Annunzio, Via dei Vestini 31, 66100, Chieti, Pescara, Italia  
dnovembre@unich.it

## ABSTRACT

The Miocene pyroclastic rocks at the base of the comenditic Monte Ulmus unit (black vitrophyre and pink ignimbrite) have yielded a ubiquitous and abundant population of xenoliths of pyrometamorphosed calcareous rocks coming from the substrate. The paragenesis suggests a prograde and a retrograde episode (the latter clearly related to the post-emplacement cooling of pyroclastic unit), and gives an idea of the (quick) kinetics of reaction processes. The Sr isotope data, by comparison to those of the main carbonatic outcrops of the Sulcis area, confirm that a Cambrian protolith is involved in the genesis of xenoliths at the upper part of a magmatic chamber.

**Key-words:** Anorthite, Calc-silicate, Pyrometamorphism, Pyroclastic comendite, Italy.

## RESUMEN

Las rocas miocenas de la base de la unidad comendítica de Monte Ulmus (vitrófiro basal negro e ignimbrita rosa) han proporcionado una abundante y ubicua presencia de xenolitos de rocas carbonáticas pirometamorfizadas. La paragénesis presente sugiere un episodio progradante y uno retrogradante (siendo éste producido por el enfriamiento post-emplazamiento de las rocas piroclásticas) que dan una idea (en especial el retrógrado) de la (rápida) cinética de los procesos de reacción. Los datos de isotopía del Sr confirman, una vez comparados con los de los principales afloramientos del substrato de la región del Sulcis, que un protolito cámbrico está implicado en la génesis de los xenolitos en la parte superior de una cámara magmática.

**Palabras clave:** Anortita, Calcosilicatos, Pirometamorfismo, Comendita piroclástica, Italia.

Geogaceta, 63 (2018), 103-106  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 15 de julio de 2017  
Revisión: 11 de octubre 2017  
Aceptación: 23 de octubre 2017

## Introducción

La presencia de xenolitos carbonatados afectados por pirometamorfismo, en el seno de rocas volcánicas es un campo de estudio relativamente poco tratado, a pesar de su enorme potencial (véase por ej. Sabine y Young, 1975) tanto en mineralogía descriptiva como en el establecimiento de las condiciones térmicas de la síntesis de algunas fases a baja presión. En el caso de líticos accesorios (que en adelante denominaremos xenolitos) presentes en rocas volcánicas, la comparación con experiencias de síntesis puede aportar ideas sobre la cinética del proceso y, en resumen, si es factible o no que estas reacciones

se produzcan en el corto espacio de tiempo producido entre la erupción y el enfriamiento del cuerpo magmático. La formación de estos xenolitos requiere la presencia de unidades carbonáticas como roca de caja de la cámara magmática o, al menos, de su techo. La isla de Cerdeña tiene un volcanismo sinorogénico bien representado de norte a sur, que es unánimemente aceptado como el producto de la rotación antihoraria del bloque Sardo-Corso (Bellon *et al.*, 1977) hacia los 19,5 - 15 Ma. En la región del Sulcis, que corresponde a la zona de máxima extensión durante la citada rotación, este volcanismo está representado en la base por un importante conjunto de rocas andesíticas (aflorante sobre carbonatos

cretácicos en la isla de Sant'Antioco) y sobre ellas un apilamiento de unidades dominante-mente piroclásticas y riolíticas de más de 500 m de espesor. El vulcanismo concluye con la presencia de diferentes unidades comendíticas (rocas definidas en la Isla de San Pietro) emplazadas en condiciones claramente anorogénicas (Assorgia *et al.*, 1990; Gisbert y Gimeno, 2017) y riolitas alcalinas atribuibles al mismo contexto geodinámico. La Unidad de Monte Ulmus es una unidad peralcalina (Assorgia *et al.*, 1990) ampliamente aflorante en las islas menores de Sant'Antioco y San Pietro (Fig. 1), y con menor presencia también en el llamado Entrotterra Sulcitano, sector SO de la isla de Cerdeña.

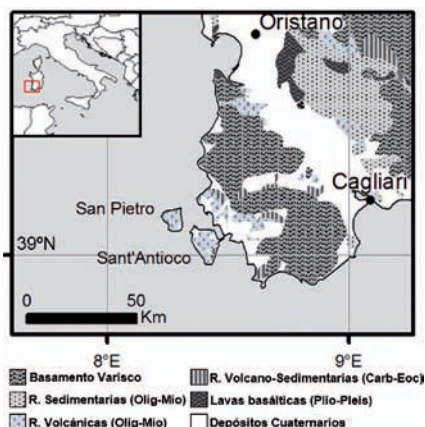


Fig. 1.- Ubicación del área de estudio, al SO de la isla de Cerdeña, Italia. Ver figura en color en la web.

Fig. 1.- Location of the study area, SW Sardinia Island, Italy. See color figure in the web.

## Contexto Geológico

La unidad de Monte Ulmus (Assorgia *et al.*, 1990; Mulas *et al.*, 2011; Gisbert, 2012; Gisbert y Gimeno, 2017) constituye el segundo grupo de rocas piroclásticas comendíticas aflorante en el Sulcis, y se caracteriza por presentar un vitrófiro basal negro (localmente), una unidad ignimbrítica vitrofírica muy soldada de color rosa en la base (y de distribución ubicua) y un conjunto de materiales piroclásticos densamente soldados y sometidos a intenso reomorfismo que afloran principalmente en la parte oeste de la isla de San Pietro. No hay unanimidad en cómo finaliza el techo de esta unidad (Assorgia *et al.*, 1990; Mulas *et al.*, 2011; Gisbert, 2012; Gisbert y Gimeno, 2017). Esta unidad aflora principalmente sobre los de-

pósitos lávicos y piroclásticos precedentes, en especial sobre rocas piroclásticas de la Unidad Comendítica, pero también excediendo estos límites en altos estructurales y sobreponiéndose a la mayoría de las unidades volcánicas miocenas precedentes. El basamento de todos estos materiales corresponde a rocas metamórficas paleozoicas carbonáticas y siliciclásticas, cubierto por rocas sedimentarias mesozoicas y depósitos sedimentarios detríticos eocenos y miocenos (Pecorini y Pomesano Cherchi, 1969). La parte superior de la serie volcánica, con edades entre los 18-13 Ma (Araña *et al.*, 1974; Bellon *et al.*, 1977; Savelli *et al.*, 1979; Garbarino *et al.*, 1990; Maccioni *et al.*, 1990; Pasci *et al.*, 2001; Pioli, 2003) presenta un magmatismo anorogénico peralcalino caracterizado por domos, coladas lávicas y unidades piroclásticas comendíticas (Mulas *et al.*, 2011). Este estudio se refiere principalmente a xenolitos que aparecen, tanto en el vitrófiro negro como en la ignimbrítica vitrofírica soldada de la parte basal de la Unidad Monte Ulmus (Fig. 2). En el vitrófiro basal son abundantes los xenolitos calcosilicatados que han sido ya tentativamente atribuidos a rocas carbonáticas del basamento del Sulcis de edad Cámbrica y Cretácica (Gisbert, 2012). La ignimbrítica rosa corresponde a una unidad de flujo fuertemente soldada y presenta textura eutáxítica. Con una paragénesis mineral correspondiente a sanidina, cuarzo, anfíboles sódicos (asociados a una fase vapor), opacos y zircón; ocasionalmente contiene fragmentos líticos accidentales y pumitas negras (Gisbert y Gimeno, 2017). Dado que estos xenolitos son potenciales indicadores de la roca encajante de la unidad comendítica y, por lo tanto, de una manera aproximada, de la profundidad de la cámara magmática, se ha procedido a un muestreo específico para su estudio mineralógico, geoquímico y de isotopía de Sr.

## Metodología

El muestreo contempló la variabilidad de facies a lo largo de la columna estratigráfica de los distintos flujos piroclásticos de la unidad Monte Ulmus y también los afloramientos de rocas carbonáticas cámbricas y cretácicas próximas al área de estudio (islas de San Pietro, Sant'Antioco y la zona del Sulcis). En una primera instancia se procedió al reconocimiento óptico mediante microscopio petrográfico y microscopio electrónico de barrido (SEM/EDS) en los CCIT de la Universitat de Barcelona. Se analizaron 10 muestras de xenolitos en el Laboratorio de Difractometría de Rayos X del

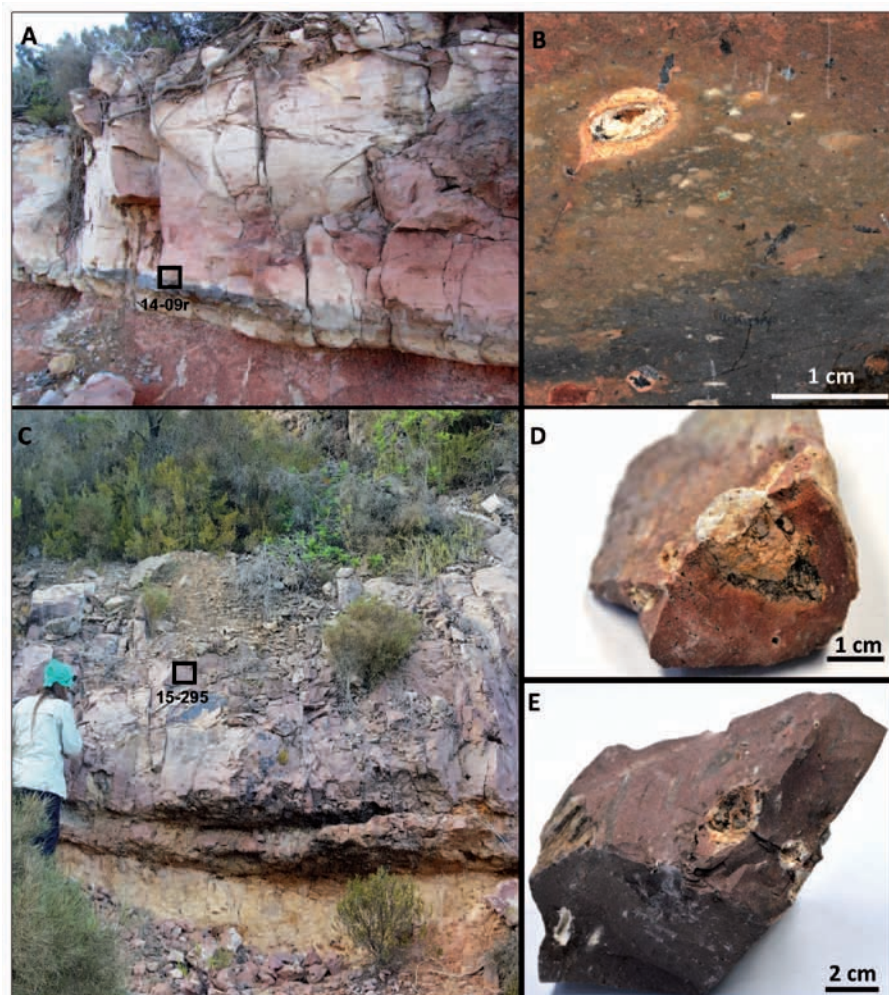


Fig. 2.- Afloramiento y muestras de mano de xenolitos calcosilicatados del SO de Cerdeña, Italia. A) Vitrófiro basal y unidad piroclástica Monte Ulmus en Cala Saboni, Sant'Antioco. B) Xenolito en detalle correspondiente a la fotografía A, tomado en el nivel del vitrófiro, muestra 14-09r. C) Afloramiento de Unidad Monte Ulmus en zona de la Pirámide, San Pietro. D y E) Distintos xenolitos del afloramiento en C. La fotografía D corresponde con la muestra 15-295, tomada hacia el centro de la unidad piroclástica. Ver figura en color en la web.

Fig. 2.- Outcrop and samples detail of calc-silicate xenoliths from SW Sardinia, Italy. A) Basal vitrophyre and pyroclastic Monte Ulmus unit in Cala Saboni, Sant'Antioco. B) Xenolith of the A photograph, in the level of the vitrophyre - sample 14-09r. C) Outcrop of Mount Ulmus Unit in the Piramide area, San Pietro. D-E) Different xenoliths from outcrop in C. Photograph D corresponds to sample 15-295. See color figure in the web.

Departamento de Ingeniería y Geología de la Università Gabriele D'Annunzio, Chieti-Pescara, Italia. Los xenolitos fueron pulverizados a partículas de tamaño inferior a 60  $\mu\text{m}$  y analizados por difracción de rayos-X en polvo de roca total (XRPD). El instrumento utilizado fue un Siemens D5000 operativo con geometría de Bragg-Brentano,  $\text{CuK}\alpha=1.518 \text{ \AA}$ , 40 kV, 40mA, intervalo 5-45° de exploración de 2theta y tamaño de paso 0.020° 2theta. La identificación de las fases y la asignación relativa de picos se realizaron con referencia a los siguientes códigos JCPDS: 00-002-0014 montmorillonita, 00-009-0334 illita, 00-011-0417 hialofana, 00-045-0181 analcima, 00-020-0528 anortita sódica, 00-019-0210 gehlenita, 00-029-1495 rectorita, 00-018-1222 egirina, 00-002-0676 augita, 00-011-0418 celsiana, 00-010-0357 sanidina, 00-039-1425 cristobalita, 00-002-0017 nontronita, 00-016-0152 tridimita, 00-005-0490 cuarzo y 00-036-0425 dolomita. Con el propósito de cuantificar las fases cristalinas y amorfas mediante la aplicación combinada de los métodos Rietveld y Reference Intensity Ratio (RIR) se añadió a todas las muestras 10% de Corindón NIST 676a, según Novembre *et al.* (2014). Las mezclas en polvo fueron homogeneizadas por trituración manual con un mortero de ágata. Los datos isotópicos fueron obtenidos de 16 muestras correspondientes a xenolitos y rocas carbonáticas separados con microtaladro en fracción polvo. Los análisis se realizaron en los Centros Geocronológicos de la Universidad Complutense de Madrid y la Universidad del País Vasco. El estándar isotópico de Sr utilizado fue NBS987 con un valor promedio de 0.710246

$\pm 7.1\text{E}^{-6}$  ( $2\sigma$ ) en el primer laboratorio y  $0.710272 \pm 1.8\text{E}^{-5}$  ( $2\sigma$ ) en el segundo. El Sr se purificó en columnas cromatográficas de intercambio catiónico con Sr-resin, según el método descrito por Pin *et al.* (1994) en Bilbao, y con resina DOVEXAG-50x12 en Madrid. Las muestras fueron introducidas como aerosoles húmedos en un espectrómetro Thermo Neptune MC-ICP-MS mediante micronebulizador PFA de ESI con aspiración nominal de  $50 \mu\text{L min}^{-1}$  y una cámara de expansión dual ciclónica-Scott de doble paso en 4 bloques de 13 ciclos cada uno. El fraccionamiento de masas instrumental y la interferencia de Kr se corrigieron siguiendo el protocolo de Balcaen *et al.* (2005) en Bilbao; mientras que, en Madrid, se utilizó un Espectrómetro de masas TIMS-Phoenix con adquisición de datos por multicolección dinámica durante 10 bloques de 16 ciclos cada uno, con una intensidad de haz en la masa  $^{88}\text{Sr}$  de 3V. Los análisis de Sr se corrigieron para las posibles interferencias de  $^{87}\text{Rb}$ . Las relaciones  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  se normalizan respecto al valor medido de la relación  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$ .

## Resultados

El conjunto mineralógico determinado difractométricamente se compone de anortita sódica, sanidina, egirina, cuarzo, analcima, hialofana, celsiana, tridimita, cristobalita, gehlenita y minerales arcillosos (montmorillonita, illita, nontronita y rectorita). Dos muestras de xenolitos presentan el pico principal de la dolomita a 30.951 2theta, como fase primaria y relicta de la roca encajante carbonática. En todos los análisis se observa una fase vítrea importante.

Se exponen los difractogramas (Fig. 3) representativos de etapas más evolucionadas del proceso pirometamórfico, debido a la ausencia de cristobalita y tridimita, fases muy comunes en el resto de los xenolitos estudiados. En particular, en la muestra 14-09r dominan las fases de temperatura alta y media, mientras que en la muestra 15-295 las fases de baja temperatura son más abundantes. Los resultados isotópicos de la relación  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de las rocas carbonáticas cámblicas corresponden a calizas con arqueociátidos del Miembro Matoppa (Fm. Nebida) cuyo valor promedio es  $0.708903 \pm 7\text{E}^{-6}$ , al Miembro Caliza Ceroide ( $0.709175 \pm 1\text{E}^{-5}$ ) y Dolomia Gialla ( $0.708801 \pm 9\text{E}^{-6}$ ) formada a expensas de la Fm. Gonessa; y el Cretácico representado por una caliza fosilífera de facies urgoniana ( $0.707482 \pm 6\text{E}^{-6}$ ), que aflora en la localidad de Maladroxia, Sant'Antioco. Los xenolitos calcosilicatados tienen un valor promedio de  $0.709140 \pm 6\text{E}^{-6}$ . Los datos isotópicos de la literatura para la unidad piroclástica Monte Ulmus corresponden a 0.7176, 0.7311 (Gisbert, 2012) y 0.7132 (Morra *et al.*, 1994).

## Discusión

Los estudios realizados hasta la fecha en xenolitos calcosilicatados en la secuencia piroclástica de Monte Ulmus, pueden ser indicadores de un proceso de asimilación de rocas del encajante por parte de los magmas comendíticos en un grado que aún desconocemos. Por consiguiente, pueden tener implicaciones en términos petrogenéticos y/o de mecanismos eruptivos, que no han sido contemplados para las rocas volcánicas de Cerdeña, en la biblio-

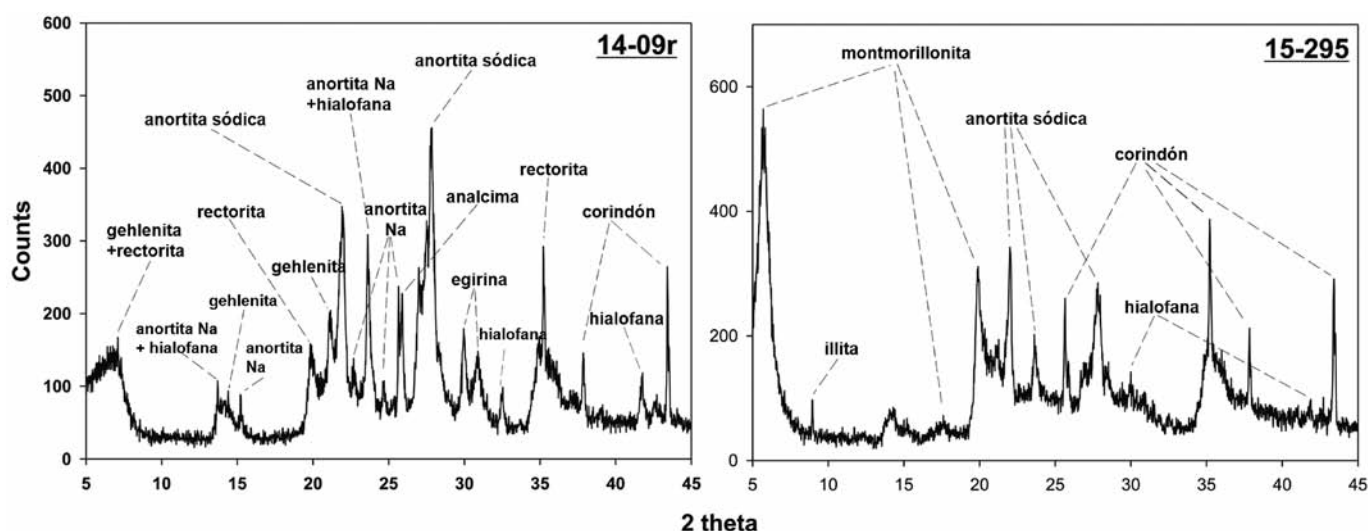


Fig. 3.- Difractogramas de xenolitos en la Unidad Monte Ulmus: muestra 14-09r con paragénesis calcosilicatada en vitrófiro basal (Sant'Antioco) y muestra 15-295 en porción central de la unidad piroclástica (San Pietro).

Fig. 3.- Diffractograms obtained for xenoliths in the Monte Ulmus Unit: sample 14-09r from the basal vitrophyre, with a calc-silicate paragenesis and sample 15-295 from the central portion of the pyroclastic unit (San Pietro).

grafía consultada hasta el momento. La temperatura a la que esta reacción tiene lugar debe entenderse en los términos de reacciones metasomáticas que podrían producirse a 650-800°C (Scaillet y Macdonald, 2001) entre un magma peralcalino y su encajante, con una consecuente disminución de la temperatura durante el evento piroclástico, posiblemente por debajo de los 500°C. Esto concuerda con las detalladas observaciones de Sabine y Young (1975) sobre la presencia de paragénesis correspondientes a un pirometamorfismo progradante de alta temperatura, seguido por las fases retrogradantes formadas durante la fase de más alta temperatura del proceso de enfriamiento de la unidad piroclástica. A partir de esto podemos inferir una paragénesis en función de la temperatura, como se muestra en la tabla I. Minerales como la celsiana que corresponden a feldespatos de Ba se forman a expensas del Ba sedimentario de las rocas carbonatadas. Según Marcello *et al.* (2004), todo el miembro carbonático cámbrico muestra una anomalía geoquímica positiva para Ba (valores locales exceden los 1000 ppm) y también en Pb y Zn (20-100 ppm). No es posible pensar en el aporte de Ba de las rocas comendíticas ya que el valor medio para Monte Ulmus es bajo, con concentraciones del orden de 63 ppm (Gisbert y Gimeno, 2017), mientras que los análisis realizados en la caliza fosilífera cretácica dan como resultado valores mucho más bajos (del orden de 4 ppm) y los obtenidos para los xenolitos superan los 400 ppm. Los resultados isotópicos confirman la afinidad de los xenolitos con las rocas carbonáticas del Cámbrico, y en vistas de la evidencia mineralógica y geoquímica, con especial predominancia de las formaciones dolomíticas.

## Conclusiones

Los resultados mineralógicos permiten distinguir con claridad la presencia de fases minerales neoformadas durante el episodio de pirometamorfismo progradante y retrogradante, ya que no son atribuibles ni a la roca

volcánica ni a la composición del substrato y proporcionan una idea del rango de temperaturas requerido, teniendo en cuenta los datos aportados por la petrología experimental. La paragénesis de baja temperatura permite una interpretación de génesis *in situ* durante el enfriamiento post-emplazamiento de la ignimbrita. Los datos isotópicos y geoquímicos obtenidos, discriminan el nivel de procedencia de los xenolitos de la unidad piroclástica Monte Ulmus, correspondientes a las rocas carbonáticas del Cámbrico, y en una fase más evolucionada de este trabajo pueden dar una idea aproximada de la profundidad del techo de la cámara magmática correspondiente a la Unidad Monte Ulmus.

## Agradecimientos

Los estudios XDRP se realizaron mediante el programa de becas APIF 2016-2017 de la Universitat de Barcelona en colaboración con la Università degli Studi G. D'Annunzio, Chieti, Pescara. Los autores agradecen el apoyo técnico de los SGIker de la UPV/EHU y la financiación europea (FEDER y FSE) y al Centro de Geocronología y Geoquímica Isotópica de la UCM-CEI. Se agradece también al Dr. Enrique Arranz Yagüe y a un revisor anónimo, por las sugerencias de mejora del manuscrito.

## Referencias

- Araña, V., Barberi, F. y Santacrose, R. (1974). *Bulletin Volcanologique* 38, 725-36.
- Assorgia, A., Fadda, A., Gimeno, D., Morra, V., Ottelli, L. y Secchi, F.A. (1990). *Memorie della Società Geologica Italiana* 45, 951-963.
- Balcaen, L., De Schrijver, I., Moens, L. y Vanhaecke, F. (2005). *International Journal of Mass Spectrometry* 242, 251-255.
- Bellon, H., Coulon, C. y Edel, J.B. (1977). *Bulletin de la Société Géologique de France* 19(4), 825-831.
- Garbarino, C., Lirer, L., Maccioni, L. y Salvadori, I. (1990). *Carta vulcanologica dell'Isola di*

- San Pietro* (Sardegna). 1:25,000. Editor: SELCA, Firenze.
- Gisbert, G. (2012). *The Miocene volcanism of the Sulcis area (SW Sardinia, Italy): Petrology, petrogenesis and geodynamic significance. PhD Thesis*, Universitat de Barcelona, 345 p.
- Gisbert, G. y Gimeno, D. (2017). *Geological Magazine* 154(4), 740-756.
- Maccioni, L., Marchi, M. y Assorgia, A. (1990). *Carta geopetrografica dell'Isola di Santo Antioco* (Sardegna). 1:25,000. Editor: SELCA, Firenze.
- Marcello, A., Pretti, S., Valera, P., Agus, M., Boni, M. y Fiori, M. (2004) In: *32nd International Geological Congress Florence, Italy: Field Trip Guide Book P30-Post-Congress* 4, 14-36.
- Morra, V., Secchi, F.A. y Assorgia, A. (1994). *Chemical Geology* 118, 109-42.
- Mulas, M., Mundula, F. y Cioni, R. (2011). *Acta Vulcanologica* 23, 17-26.
- Novembre, D., Pace, C. y Gimeno, D. (2014). *Mineralogical Magazine* 78, 1209-1225.
- Pasci, S., Pioli, L., Pisanu, G., Rosi, M., Sale, V., Benvenuti, E. y Laurenzi, M. (2001). In: *Geitalia, III FIST Meeting*, Chieti, Italy.
- Pecorini, G. y Pomesano Cherchi, A. (1969). *Memorie della Società Geologica Italiana* 8, 421-451.
- Pin, C., Briot, D., Bassin, C. y Poitrasson, F. (1994). *Analytical Chimical Acta* 298, 209-217.
- Pioli, L. (2003). *High-grade ignimbrites from the Sulcis volcanic district (SW Sardinia, Italy): the example of Nuraxi tuff. PhD Thesis*, Università di Pisa, 157 p.
- Sabine, P.A. y Young, B.R. (1975). *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* 280(1294), 225-269.
- Savelli, C., Beccaluva, L., Deriu, M. y Maccioni, L. (1979). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 5, 257-269.
- Scaillet, B. y Macdonald, R. (2001). *Journal of Petrology* 42(4), 825-845.