

Coeficientes de reparto de Elementos del Grupo del Platino entre fundidos sulfurados y arseniurados

Rubén Piña (1*), Fernando Gervilla (2), Hassan Helmy (3), Raúl Fonseca (4), Chris Ballhaus (5)

(1) Departamento de Mineralogía y Petrología. Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid (España)

(2) Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra. CSIC-Universidad de Granada, 18100 Armilla, Granada (España)

(3) Department of Geology. Minia University, 61519 Minia (Egypt)

(4) Institut für Geologie, Mineralogie und Geophysik, Ruhr-Universität Bochum. 44801 Bochum (Germany)

(5) Steinmann Institut, Universität Bonn. Poppelsdorfer Schloss, 53115, Bonn (Germany)

* corresponding author: rpinagar@ucm.es

Palabras Clave: Elementos del Grupo del Platino, Inmiscibilidad líquida, LA-ICP-MS, Coeficientes de reparto. **Key Words:** Platinum Group Elements, Liquid immiscibility, LA-ICP-MS, Partition coefficients.

INTRODUCCIÓN

Desde la década de los 90, varios estudios experimentales han demostrado la existencia de inmiscibilidad líquida entre fundidos ricos en S (fundidos sulfurados) y ricos en As (fundidos arseniurados) a temperaturas magmáticas (850-1200°C) (Makovicky et al., 1990; Fleet et al., 1993; Sinyakova & Kosyakov, 2012; Helmy et al., 2013). Además, estos trabajos han demostrado que los fundidos arseniurados concentran de manera preferente los Elementos del Grupo del Platino (EGP, Os, Ir, Ru, Rh, Pt y Pd) respecto a los fundidos sulfurados. Este mecanismo de inmiscibilidad líquida y la compatibilidad de los EGP en los fundidos arseniurados explica la formación de (sulfo)-arseniuros enriquecidos en EGP en relación con sulfuros pobres en EGP en varios depósitos de sulfuros magmáticos de Ni-Cu-(EGP) (Gervilla et al., 1996; Hanley, 2007; Godel et al., 2012; Piña et al., 2013; Moroni et al., 2017). Aunque estos trabajos ponen de manifiesto el profundo efecto que los fundidos ricos en As tienen en la distribución de los EGP, existen muy pocos estudios que hayan tratado de determinar de una manera cuantitativa los coeficientes de distribución de los EGP entre ambos fundidos (D_{EGP}). A partir de la distribución de EGP en mineralizaciones de sulfuros con arseniuros asociados, Hanley (2007) y Godel et al. (2012) infirieron D_{EGP} del orden de 10-100 y 25-400, respectivamente. De manera similar, Piña et al. (2013) estimaron valores entre 50 y 920 en la mineralización de Ni-Cu de Amasined en Beni Bousera (Marruecos). Por su parte, Wood (2003) estimó un D_{Pd} mínimo experimental de 34.

El objetivo de este estudio es determinar de manera cuantitativa los D_{EGP} entre los fundidos sulfurados y arseniurados. Para ello se ha llevado a cabo un estudio experimental en donde se han equilibrado ambos fundidos en un rango de temperaturas entre 1200 °C y 1000 °C a partir de un producto inicial de sulfuros de Ni-Cu-Co saturado en As y con cantidades traza de EGP. Además, para estudiar cómo se comportan los EGP durante el enfriamiento del líquido arseniurado, se realizó un experimento en donde el fundido arseniurado se enfrió lentamente hasta alcanzar los 840 °C. Los productos obtenidos en cada uno de los experimentos se analizaron mediante LA-ICP-MS con el objetivo de determinar el contenido en EGP y otros elementos traza.

RESULTADOS E IMPLICACIONES GEOLÓGICAS

En los experimentos realizados a 1200 °C y 1100 °C aparecen glóbulos de fundido arseniurado incluidos dentro de una matriz de fundido sulfurado (Fig. 1a-b). En el experimento a 1000 °C, la fase de As coexiste en equilibrio con MSS (monosulfide solid solution) y un líquido sulfurado (Fig. 1c), mientras que en el experimento enfriado hasta 840 °C, se observan 4 fases diferentes (Fig. 1d-e): MSS, ISS (intermediate solid solution), ambas fases procedentes del fundido sulfurado inicial, y una fase arseniurada con Co (3,38 % en peso de Co, 35,06 % en peso Ni) junto con otra rica en Ni y pobre en Co (1,05 % en peso de Co, 44,05 % en peso Ni).

Los análisis de LA-ICP-MS muestran que todos los EGP se concentran en mayores proporciones en los glóbulos de fundido arseniurado (Os ~ 350-540 ppm; Ir ~ 365-618 ppm; Ru ~ 352-582 ppm; Pt ~ 354-695 ppm; Pd ~ 441-673 ppm) que en los sulfuros (Os ~ 5-6 ppm; Ir < 2.1 ppm; Ru ~ 2,1-13 ppm; Pt < 3,6 ppm; Pd < 27 ppm). Con respecto a los productos obtenidos en el experimento realizado a 840 °C, se observa que existe un fraccionamiento

de los EGP con Os, Ir, y Ru concentrados preferentemente en la fase arseniurada rica en Co, mientras que el Pt y el Pd se concentran en la fase relativamente pobre en Co y rica en Ni.

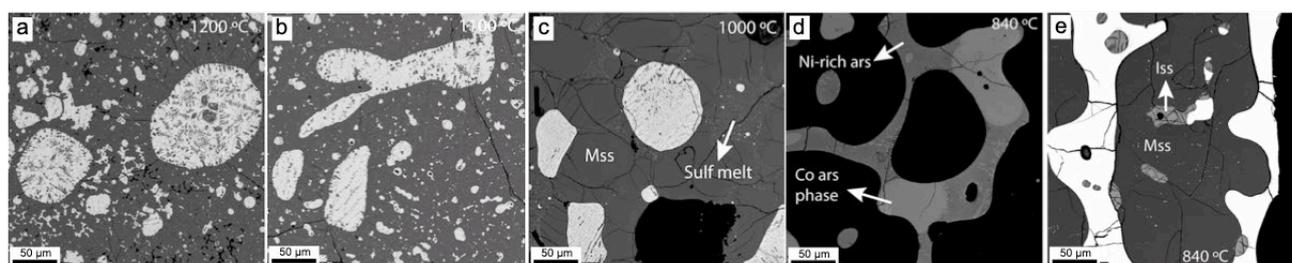


Fig 1. Imágenes tomadas con electrones retrodispersados mostrando las relaciones entre las fases obtenidas en los experimentos realizados a 1200 °C (a), 1100 °C (b), 1000 °C (c) y 840 °C (d-e). En las fotos de los productos obtenidos a 1200 °C, 1100 °C y 1000 °C, la fase más brillante corresponde a fundido arseniurado, mientras que la matriz más oscura es fundido sulfurado a 1200 °C y 1100 °C, y MSS y fundido sulfurado (Sulf melt) a 1000 °C. En (d) se muestran las dos fases ricas en As intersticiales a los sulfuros (en negro) y en (e) los dos productos del fundido sulfurado, MSS e ISS.

Todos los EGP son altamente compatibles con el fundido arseniurado, con coeficientes de reparto que oscilan entre 20 y 2750, con Ir y Pt mostrando la mayor afinidad por el As (D_{Ir} 171-508, D_{Pt} 135-2750) y Os y Pd la menor (D_{Os} 57-97, D_{Pd} 25-475). Estos resultados subrayan que la formación de fundidos ricos en As, probablemente a partir de la contaminación del magma con litologías ricas en As (Hanley, 2007; Godel et al., 2012; Piña et al., 2013; Moroni et al., 2017), es un proceso clave en la metalogénesis de los EGP en sistemas magmáticos al actuar tales fundidos como eficientes colectores de estos metales. Distintos factores como el momento de segregación del fundido arseniurado (antes o después de la MSS), la saturación previa de fases minerales ricas en EGP o el propio fraccionamiento del fundido arseniurado influirán de manera notable en la distribución final de los EGP. Por último, desde un punto de vista prospectivo, las zonas mineralizadas más ricas en As de los depósitos de sulfuros de Ni-Cu-EGP representan las áreas más favorables para la exploración de EGP.

REFERENCIAS

- Fleet, M.E., Chryssoulis, S., Stone, S., Weisener, C.G. (1993): Partitioning of platinum-group elements and Au in the Fe-Ni-Cu-S system. Experiments on the fractional crystallization of sulfide melt. *Contr. Min. Petr.* **115**, 36-44.
- Gervilla, F., Leblanc, M., Torres-Ruiz, J., Fenoll Hach-Alí, P. (1996): Immiscibility between arsenide and sulfide melts: A mechanism for the concentration of noble metals. *Can. Min.*, **34**, 485-502.
- Godel, B., González-Álvarez, I., Barnes, S.J., Barnes, S.-J., Parker, P., Day, J. (2012): Sulfides and sulfarsenides from the Rosie Nickel Prospect, Duketon Greenstone Belt, Western Australia. *Econ. Geol.*, **107**, 275-294.
- Hanley, J.J. (2007): The role of arsenic-rich melts and mineral phases in the development of high-grade Pt-Pd mineralization within komatiite-associated magmatic Ni-Cu sulfide horizons at Dundonald Beach South, Abitibi subprovince, Ontario, Canada. *Econ. Geol.*, **102**, 305-317.
- Helmy, H.M., Ballhaus, C., Fonseca, R.O.C., Nagel, T.J. (2013): Fractionation of platinum, palladium, nickel, and copper in sulfide-arsenide systems at magmatic temperature. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **166**, 1725-1737.
- Makovicky, E., Karup-Moller, S., Makovicky, M., Rose-Hansen, J. (1990): Experimental studies on the phase systems Fe-Ni-Pd-S and Fe-Pt-Pd-As-S applied to PGE deposits. *Min. Petr.*, **42**, 307-319.
- Moroni, M., Caruso, S., Barnes, S.J., Fiorentini, M. (2017): Primary stratigraphic controls on ore mineral assemblages in the Wannaway komatiite-hosted nickel-sulfide deposit, Kambalda camp, Western Australia. *Ore Geol. Rev.*, **90**, 634-666.
- Piña, R., Gervilla, F., Barnes, S.-J., Ortega, L., Lunar, R. (2013): Partition coefficients of platinum-group and chalcophile elements between arsenide and sulfide phases as determined in the Amasined sulfide-graphite mineralization (Beni Bousera, North Morocco). *Econ. Geol.*, **108**, 935-951.
- Sinyakova, E.F. & Kosyakov, V.I. (2012): The behavior of noble-metal admixtures during fractional crystallization of As- and Co-containing Cu-Fe-Ni sulfide melts. *Russ. Geol. Geophys.*, **53**, 1055-1076.
- Wood, M. (2003): Arsenic in igneous systems: An experimental investigation. Unpublished B.A. Sc. thesis, Toronto, Canada, University of Toronto, 32 p.