

# Cromititas ofiolíticas: buscando un modelo genético

JOSE MARIA GONZALEZ JIMENEZ(1\*) FERNANDO GERVILLA(2) Y JOAQUIN A. PROENZA (3)

(1) Departamento de Geología y Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.

(2) Departamento de Mineralogía y Petrología e Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, (Universidad de Granada-CSIC), Facultad de Ciencias, Avda. Fuentenueva s/n, 18002, Granada, España.

(3) Departament de Cristal·lografia, Mineralogia i Dipòsits Minerals, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona, Martí i Franquès s/n, 08028, Barcelona, España.

## INTRODUCCIÓN Y DISCUSIÓN

Las ofiolitas son fragmentos de litosfera oceánica que han sido emplazados por procesos tectónicos en la corteza continental. Algunas ofiolitas presentan la particularidad de albergar cromititas: rocas que consisten casi exclusivamente en espínela cromífera o *cromita* [(Cr,Al)(Mg,Fe)<sub>2</sub>O<sub>4</sub>]. Un gran número de los cuerpos de cromititas que se reconocen en las ofiolitas se encuentran encajados en los niveles más someros de la sección representativa del manto superior, aunque también suelen ser abundantes en la zona de transición entre el manto y la corteza, y en menor medida en la propia corteza oceánica (p.e. Leblanc and Nicolas, 1992).

Las cromititas son importantes desde el punto de vista económico ya que suponen una de las fuentes primordiales de cromo, y desde el punto de vista científico porque pueden considerarse como capsulas que albergan gran cantidad de información sobre el origen y evolución del manto superior.

Los cuerpos de cromititas se encuentran en ofiolitas originadas en todas las eras Geológicas. Sin embargo, el origen de este tipo de rocas es aun incierto y muy discutido, siendo uno de los sujetos que han promovido uno de los mayores e intensos debates en la comunidad científica en el campo de las Ciencias de la Tierra durante las últimas cuatro décadas. Algunas de las preguntas que aun están pendientes de respuesta son:

(1) ¿Cómo el Cr, un elemento minoritario en las peridotitas del manto y en los magmas derivados de su fusión parcial, puede llegar a ser concentrado en cantidades tan elevadas como para formar cuerpos de cromitita masiva?

(2) ¿Qué mecanismo da lugar a la nucleación de cromita para facilitar la

acumulación de grandes cantidades de este mineral en las rocas del manto?

(3) ¿Cuál es el factor que controla el tamaño de los cuerpos de cromitita, los cuales pueden variar en espesor y longitud desde unos pocos centímetros hasta varios centenares de metros?

Con el objeto de resolver estas cuestiones se han empleado diferentes estrategias de

estudio. Esto ha llevado a la profusión de numerosos modelos genéticos, los cuales se pueden agrupar en tres grandes categorías:

(1) *Cristalización fraccionada* de fundidos basálticos en cámaras magmáticas o conductos, en el manto superior o cerca del límite manto corteza (Lago et al., 1982; Leblanc and Ceuleneer, 1992; Leblanc and Nicolas, 1992). Este modelo incluye algunas variantes que consideran que la cristalización fraccionada se alcanza debido a la modificación de la composición del fundido (contenido de SiO<sub>2</sub>) como una consecuencia inevitable de su reacción con la peridotita circundante durante su desplazamiento en el manto (Zhou et al., 1994; Edwards et al., 2000), o la asimilación por parte del fundido que se desplaza, de rocas máficas pre-existentes (Arai et al., 2004; Bédard and Hébert, 1998; Borisova et al., 2012; Proenza et al., 1999).

(2) *Mezcla de fundidos basálticos en canales duniticos* (Arai, 1997; Arai and Yurimoto, 1994; Gervilla et al., 2005; González-Jiménez et al., 2011a; Zhou et al., 1994).

(3) *Segregación de volátiles* a partir de pequeñas fracciones de fundidos basálticos hidratados muy evolucionados (Gervilla et al., 2002; González-Jiménez et al., 2011b); en este proceso, los cambios de fugacidad de oxígeno juegan un papel muy importante (Melcher et al., 1997; Proenza et al.,

1999).

En la última década, el desarrollo de las técnicas de experimentación ha permitido cristalizar cromita en los laboratorios en las condiciones de presión y temperatura que suponemos predominan durante la formación de las cromititas en el manto.

Ballhaus (1998) observó en sus experimentos realizados a 1 atm de presión y 1150 °C, para fundidos basálticos del sistema SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-FeO-K<sub>2</sub>O y saturados con FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, que la mezcla de fundidos con contenidos diferentes de SiO<sub>2</sub> no llega a realizarse de forma completa, sino que se produce una emulsión (i.e., *mingling*) de gotas de fundido menos silíceo. Sus resultados muestran que los cristales de cromita solo nuclean en las gotas de fundido más pobre en SiO<sub>2</sub>, imitando la morfología

redondeada o globular de éstas, dando lugar a las texturas nodulares y orbiculares que se encuentra de manera muy frecuente en los cuerpos de cromitita. Ballhaus (1998) presenta un modelo numérico que explica la génesis de los cuerpos de cromita masivos que frecuente se encuentran en las porciones de manto ofiolítico. Tomando de partida dos fundidos extremos que normalmente se suelen encontrar en el manto ofiolítico: uno picrítico (~2 GPa, 1295 °C) y otro boninitico (~0.5 GPa, 1275 °C), demuestra que la mezcla de magmas es un mecanismo muy efectivo para precipitar cromita y dar lugar a la formación de cromititas en las zonas mas someras del manto superior, en zonas de supra-subducción. Mas recientemente, Matveev y Ballhaus (2002) realizaron experimentos en los cuales sobresaturaron ambos fundidos extremos en agua. Sus resultados muestran que la segregación de agua de fundidos que ya contienen cristales de cromita hace que éstos tiendan a

acumularse junto con la fase acuosa, debido a su mayor afinidad (propiedades de mojado) con respecto al/los líquido(s) silicatados. Esta serie de experimentos pone de relieve que el mecanismo más efectivo para formar cuerpos de cromita en el manto es la mezcla de fundidos basálticos hidratados.

Otro avance importante a la hora de responder a las preguntas arriba planteadas sobre el origen de las cromititas se ha basado en el desarrollo de nuevas técnicas de microanálisis. Hoy en día el uso de ablación láser acoplada a ICP-MS multicolelector ha permitido analizar las relaciones isotópicas  $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$  y  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  en inclusiones individuales de minerales del grupo del platino (PGM) y sulfuros de metales base (SMB) en las cromititas y peridotitas encajantes. Los resultados obtenidos indican que granos individuales de MGP y SMB tanto en las cromititas como en las peridotitas muestran diferencias muy importantes de las relaciones de  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  a la escala de granos individuales formando parte de una misma inclusión compuesta (Marchesi et al., 2011; González-Jiménez et al., 2012). Dichos resultados se han interpretado como una evidencia de la intervención de diferentes pulsos de fundidos a la hora de formar el cuerpo de cromitita.

Por otro lado, la re-evaluación de algunas de las relaciones de campo entre las cromititas y las peridotitas encajantes ha aportado nuevos datos relevantes a la hora de interpretar su génesis. En algunas ofiolitas las cromititas muestran claras evidencias de asimilación de las dunitas en las que encajan. Dichas relaciones espaciales han recobrado un nuevo sentido a la luz de los datos experimentales y geoquímicos. En el modelo que ahora se propone, los pods de dunitas que suelen albergar a las cromititas en las porciones de manto harzburgítico, representarían canales de extracción de fundidos basálticos. La formación de los cuerpos de cromititas se asociaría a las zonas de intersección entre diferentes canales rellenos de fundido basáltico. De este modo, fundidos extraídos en diferentes sectores del manto, con diferentes grados de evolución, podrían llegar a ponerse en contacto en una zona de intersección dando lugar a la mezcla de magmas necesaria para nuclear cromita. El escenario más propicio para esta situación se daría en

las zonas de expansión donde se genera nueva litosfera oceánica y donde fundidos basálticos derivados de la astenosfera ascienden e infiltran en el manto suprayacente (González-Jiménez et al. 2014). En particular, la formación de fundidos lo suficiente hidratados para dar lugar a la segregación de pequeñas fracciones de líquidos silicatados ricos en volátiles que produjeren la acumulación de cromita tal y como reproducen Matveev y Ballhaus (2002) en sus experimentos, se asociaría a cuencas marginales desarrolladas en ambientes de arcos de islas.

## REFERENCIAS

- Arai, S., Yurimoto, H. (1994): Podiform chromitites of the Tari-Misaka ultramafic complex, Southwest Japan, as mantle-melt interaction products. *Econ. Geol.*, **89**, 1279–1288.
- Arai, S., Uesugi, J., Ahmed, A.H. (2004): Upper crustal podiform chromitite from the northern Oman ophiolite as the stratigraphically shallowest chromitite in ophiolite and its implication for Cr concentration. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **147**, 145–154.
- Arai, S. (1997): Control of wall-rock composition on the formation of podiform chromitites as a result of magma/peridotite interaction. *Resource Geology* **47**, 177–187.
- Ballhaus, C. (1998): Origin of podiform chromite deposits by magma mingling. *Earth Planet. Sci. Lett.* **156**, 185–193.
- Bédard, J.H., Hébert, R., 1998. Formation of chromitites by assimilation of crustal pyroxenites and gabbros into peridotitic intrusions: North Arm Mountain massif, Bay of Islands ophiolite, Newfoundland, Canada. *Journal of Geophysical Research* **103**, 5165–5184.
- Borisova, A., Ceuleneer, G., Kamenetsky, V.S., Arai, S., Bejina, F., Abily, B., Bindeman, I.N., Polvé, M., Parseval, P., Aigouy, T., Pokrovsk, G., 2012. A new view on the petrogenesis of the Oman ophiolite chromitites from microanalysis of chromite-hosted inclusions. *J. Petrol.* **33**, 2411–2440.
- Edwards, S.J., Pearce, J.A., Freeman, J., 2000. New insights concerning the influence of water during the formation of podiform chromite. *Boulder In: Dilek, Y., Moores, E.M., Elthon, D., Nicolas, A. (Eds.), Ophiolites and oceanic crust: new insights from field studies and the ocean drilling program. Geological Society of America. Special Paper*, 349, pp. 139–147.
- Gervilla, F., Gutiérrez-Narbona, R., Fenoll-Hach Ali, P. 2002. The origin of different types of magmatic mineralizations from small-volume melts in the Iherzolite massif of the Serranía de Ronda. *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía* **25**, 79–96.
- Gervilla, F., Proenza, J.A., Frei, R., González-Jiménez, J.M., Garrido, C.J., Melgarejo, J.C., Melbom, A., Díaz-Martínez, R., Lavaut, W. 2005. Distribution of platinum-group elements and Os isotopes in chromite ores from Mayarí-Baracoa Ophiolite Belt (eastern Cuba). *Contrib. Mineral. Petrol.* **150**, 589–607.
- González-Jiménez, J.M., Proenza, J.A., Gervilla, F., Melgarejo, J.C., Blanco-Moreno, J.A., Ruiz-Sánchez, R., Griffin, W.L. (2011a): High-Cr and high-Al chromitites from the Sagua de Tánamo district, Mayarí-Cristal Ophiolitic Massif (eastern Cuba): constraints on their origin from mineralogy and geochemistry of chromian spinel and platinum-group elements. *Lithos* **125**, 101–121.
- González-Jiménez, J.M., Augé, T., Gervilla, F., Bailly, L., Proenza, J.A., Griffin, W.L., (2011b): Mineralogy and geochemistry of platinum-rich chromitites from the mantle-crust transition zone at Ouen Island, New Caledonia ophiolite. *Can. Mineral.*, **49**, 1549–1570.
- González-Jiménez, J.M., Gervilla, F., Griffin, W.L., Proenza, J.A., Augé, T., O'Reilly, S.Y., Pearson, N.J. (2012): Os-isotope variability within sulfides from podiform chromitites. *Chem. Geol.*, **291**, 224–235.
- González-Jiménez, J.M., Griffin, W.L., Proenza, J.A., Gervilla, F., O'Reilly, S.Y., Akbulut, M., Pearson, N.J., Arai, S. 2014. Chromitites in ophiolites: How, where, when, why? Part II. The crystallization of chromitites. *Lithos* **189**, 140–158.
- Lago, B., Rabinowicz, M., Nicolas, A., 1982. Podiform chromite ore bodies: a genetic model. *J. Petrol.* **23**, 103–125.
- Leblanc, M., Ceuleneer, G., 1992. Chromite crystallization in a multicellular magma flow: evidence from a chromite dike in the Oman ophiolite. *Lithos* **27**, 231–257.
- Leblanc, M., Nicolas, A., 1992. Ophiolitic chromitites. I. *G. Review* **34**, 653–686.
- Marchesi, C., González-Jiménez, J.M., Gervilla, F., Garrido, C.J., Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y., Proenza, J.A., Pearson, N.J., 2011. In situ Re-Os isotopic analysis of platinum-group minerals from the Mayarí-Cristal ophiolitic massif (Mayarí-Baracoa Ophiolitic Belt, eastern Cuba): implications for the origin of Os-isotope heterogeneities in podiform chromitites. *Contrib. Mineral. Petrol.* **161**, 977–990.
- Melcher, F., Grum, W., Simon, G., Thalhammer, T.V., Stumpf, E.F. (1997): Petrogenesis of the ophiolitic giant chromite deposits of Kempirsai, Kazakhstan: a study of solid and fluid inclusions in chromite. *J. Petrol.* **38**, 1419–1458.
- Proenza, J.A., Gervilla, F., Melgarejo, J.C., Bodinier, J.L. (1999): Al- and Cr-rich chromitites from the Mayarí-Baracoa Ophiolitic Belt (Eastern Cuba): consequence of interaction between volatile-rich melts and peridotites in suprasubduction mantle. *Econ. Geol.*, **94**, 547–566.
- Zhou, M.F., Robinson, P.T., Bai, W.J. (1994): Formation of podiform chromites by melt-rock interaction in the upper mantle. *Mineral. Deposita.*, **29**, 98–101.