

XXXVIII Reunión de la Sociedad Española de Mineralogía



Recursos Minerales Críticos

Ronda (Málaga)

25 de junio de 2019

Editor:
Salvador Morales Ruano



Sociedad Española de Mineralogía

www.semineral.es

**Seminarios de la Sociedad Española de
Mineralogía
Volumen 14**

**Recursos Minerales
Críticos**

**Seminario celebrado en el Convento de Santo Domingo
(Palacio de Congresos) de la ciudad de Ronda (Málaga) el
25 de junio de 2019**

**Editor:
Salvador Morales Ruano**



Seminarios de la Sociedad Española de Mineralogía

© Sociedad Española de Mineralogía
Museo Geominero del Instituto Geológico y Minero de España
c/ Calle de Ríos Rosas, 23
28003 Madrid

<http://www.semineral.es>

Editor

Salvador Morales Ruano

Diseño

Soma Dixital, S.L.

Maquetación

Nuria Sánchez Pastor

ISSN

2659-9872

En este volumen han participado como revisores científicos Pura Alfonso Abella, Mercedes Fuertes Fuente, José María González Jiménez, Nicolás Velilla Sánchez, Cristina Villanova-de-Benavent y un revisor que desea mantener su anonimato. Angela Tate ha revisado la versión en inglés de la comunicación "Geology and mining at the Panasqueira W-Sn deposit".

NOTA EDITORIAL:

Las opiniones y los contenidos de los resúmenes publicados en este volumen son de responsabilidad exclusiva de los autores. Asimismo, éstos son responsables de obtener el permiso correspondiente para incluir material publicado en otro lugar, así como de citar convenientemente las fuentes utilizadas, exonerando a la Sociedad Española de Mineralogía y a los editores del Seminario de las responsabilidades que al respecto se puedan generar.

Index / Índice

1

Conventional and unconventional ore deposits of platinum-Group Elements (PGE)

Thomas Aiglsperger & Joaquín A. Proenza Fernández

7

La fluorita como Critical Raw Material. El ejemplo de Mina Lújar (Órgiva, Granada)

Celso Amor Castillo, Rafael Navarro Domínguez & Andrey Ilin Maximovich

23

Geology and mining at the Panasqueira W-Sn deposit

Paulo Ferraz & Filipe Pinto

33

La mina de Penouta, minería sostenible para el abastecimiento de Ta y Nb en Europa

Teresa Llorens González, Verónica Mateos Aquilino & Francisco García Polonio

43

Depósitos de litio de la península ibérica: la geología como base de su exploración

Encarnación Roda Robles, Romeu Vieira & Pedro Pablo Gil Crespo

67

Minería, mercados y precios de las tierras raras

Raquel Vergara Espuelas

Conventional and unconventional ore deposits of Platinum-Group Elements (PGE)

Thomas Aiglsperger (1*), Joaquín A. Proenza Fernández (2)

(1) Department of Civil Engineering and Natural Resources, Division of Geosciences and Environmental Engineering, Luleå University of Technology, Laboratorievägen 14, 97187, Luleå (Sweden)

(2) Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Universidad de Barcelona, Martí i Franquès s/n, 08028, Barcelona (España)

* corresponding author: thomas.aiglsperger@ltu.se

Abstract:

This contribution provides an overview of different types of ore deposits for platinum-group elements (PGE). Two main groups of PGE ore deposits are covered: (i) conventional PGE ore deposits, meaning ore deposits that currently play, or have played in the past, a major role in the global supply of PGE (i.e. magmatic ore deposits and placer deposits; respectively) and (ii) unconventional PGE ore deposits, meaning ore deposits that are not commonly considered for PGE mining but showing a certain degree of potential (i.e. hydrothermal; sedimentary and residual ore deposits). Today, the most important conventional PGE mines are situated in South Africa (*Bushveld Complex*, representing a layered mafic intrusion) and Russia (*Noril'sk-Talnakh*, representing a conduit type intrusion), which together control more than 80% of the current worldwide PGE supply. PGE-rich ores of conventional PGE ore deposit types are associated with magmatic sulfide mineralizations. Unconventional PGE ore deposits show evidence for PGE mobilization and re-precipitation down to ambient conditions. Manganese nodules and crusts on the seafloor (i.e. sedimentary ore deposit type) accumulate PGE via absorption while the enrichment of PGE in Ni-laterites (i.e. residual ore deposit type) is enhanced by biogenic-mediated processes resulting in the formation of micronuggets of PGE alloys.

Resumen:

Este trabajo hace una breve revisión de los diferentes recursos más importantes de elementos del grupo del platino (EGP), incluyendo: (i) depósitos convencionales de EGP -depósitos que son actualmente, o que han sido en el pasado, fuentes a nivel global de EGP- (i.e. depósitos magmáticos y placeres; respectivamente) y (ii) depósitos no convencionales de EGP, representados por depósitos que no han sido tradicionalmente considerados como fuentes primordiales de EGP, pero que muestran cierto potencial para ello (i.e. depósitos hidrotermales, sedimentarios y residuales). Actualmente, los depósitos convencionales (asociadas con mineralizaciones de sulfuros magmáticos) más importante se localizan en Suráfrica (*Bushveld*) y Rusia (*Noril'sk-Talnakh*), los cuales conjuntamente representan más del 80% del suministro global de EGP. En los depósitos no convencionales, las concentraciones significativas de EGP se asocian a procesos de movilización y re-precipitación de EGP en condiciones de baja temperatura. La acumulación de EGP en nódulos y concreciones de manganeso en el fondo del mar (i.e. depósitos sedimentarios) se asocia a procesos de absorción, mientras que en yacimientos de alteración meteórica como las lateritas de Ni (i.e. depósitos residuales) el enriquecimiento de EGP esta aumentado por procesos biogénicos, tales como los que han producido la formación de micropepitas de aleaciones de EGP.

Palabras Clave: Elementos del Grupo del Platino, Minerales del Grupo del Platino, Depósitos Magmáticos, Depósitos Supergénicos. | **Key Words:** Platinum-Group Elements, Platinum-Group Minerals, Magmatic Ore Deposits, Supergene Ore Deposits.

INTRODUCTION

What are PGE?

Platinum-group elements (PGE) are a group of six metals (i.e. Os, Ir, Ru, Rh, Pt and Pd) that are characterized by similar chemical and physical properties such as high resistance to corrosion and heat. In the periodic table of elements they occur as transition metals in the Groups VIII, IX and X of the Periodic Table in which the lighter PGE (i.e. Ru, Rh and Pd) appear in

period V and the heavier PGE (i.e. Os, Ir and Pt which are the densest known metals) in period VI (Fig. 1).

Platinum-Group Elements (PGE)		
44Ru hcp mp 2333°C	45Rh fcc mp 1963°C	46Pd fcc mp 1555°C
76Os hcp mp 3033°C	77Ir fcc mp 2446°C	78Pt fcc mp 1768°C

Fig 1. Platinum-group elements as listed in the periodic table of elements showing their atomic number, their crystal structure and their melting point (mp) in °C.

However, because of differences in their melting points, PGE are usually divided into IPGE (i.e. Ir group: Ir, Ru and Os; melting points 2446, 2333 and 3033 °C, respectively) and PPGE (i.e. Pd group: Pd, Pt and Rh; melting points 1555, 1768 and 1963 °C, respectively). Together with gold and silver PGE are also known as precious metals, hence highlighting their great economic value. Due to their unique properties, PGE are essential for a wide range of sophisticated technological applications and are therefore also considered critical elements for modern societies (Mudd *et al.*, 2018). Although already used by pre-Colombian South American natives for the production of artefacts, the discovery of the complete list of PGE as new elements is rather recent. The first scientific documentation of platinum goes back to the year 1748 by Antonio de Ulloa (Juan and Ulloa, 1748), when Spanish conquests found on their search for gold, Pt-Fe alloys in stream sediments in the today's area of Colombia/Ecuador. As the grains looked similar but different to silver the Spanish conquests named the grains "*platina*" meaning "*small silver*" (note that the Spanish word for silver is "*plata*"). Interestingly, the new material was considered as without use and hence worthless at that time. However, subsequent experiments with the material performed in Madrid lead to the purification of platinum in the year 1786. Os, Ir, Rh and Pd were discovered in 1803 and Ru in 1844.

Applications for PGE

Since the discovery of their unique properties in the 20th century, PGE have found applications in many fields. Today the most prominent use of PGE is that of catalytic converters for initializing oxidation and reduction reactions. In the automobile industry for example such PGE-based catalysts help to reduce emissions of e.g. carbon monoxide. Also, the chemical industry as well as the petrochemical industry rely on PGE-based catalysts where they play a major role in the production of intermediate and final products. In combination with other metals, PGE are used to achieve very hard alloys that can be used for durable coatings in industrial applications. The electronics industries use PGE for the production of e.g. liquid crystal displays, light-emitting diodes (LEDs) and computer hard discs. Due to their anticorrosive behavior, PGE are used for medical implants (e.g. dental implants) as well as for drugs against cancer. Jewelry is another prominent field for PGE usage. PGE (especially Pt, Pd and Rh) play also in the financial sector an important role where they are used for investments from simple coins/bars collection (physical) to more sophisticated financial assets (e.g. stocks and funds).

GLOBAL PGE PRODUCTION AND PRICE DEVELOPMENTS

According to the USGS 2016 Minerals Yearbook, the global PGE production by 2016 was 473 t (U.S.

Geological Survey, 2016). Approximately 23% was supplied by recycling of catalytic converters, jewelry and electronics.

However, half of the global primary (meaning from mining) PGE production was provided by South Africa, one third by Russia and the remaining by Canada, the USA and Zimbabwe. The dominance of only two countries (i.e. South Africa and Russia) accounting for >80% of the worldwide primary PGE supply, in combination with their high economic significance, has resulted that PGE are defined as "*critical materials for the EU*" by the European Commission (e.g., see European Commission, 2017). The market price for individual PGE is given in US \$ per troy ounce (\$/ozt) where 1 ozt equals 31.1 grams. Looking on the price developments of PGE (excluding Os that is locked at a price of 400 \$/ozt) for the last 5 years, a significant increase in value can be observed for Ir, Ru, Rh and Pd, whereas platinum shows a decrease (Fig. 2). The PGE with highest economic value is currently Rh with a market price of approx. 2800 US\$/ozt.



Fig. 2 Price developments for PGE except Os for the last 5 years: Ru (+350%), Ir (+265%), Rh (+170%), Pd (+82%) and Pt (-44%). Data was taken from infomine.com.

The current attractive market situation together with their status as critical metals motivates exploration projects for PGE, including the search of PGE in rather unconventional ore deposit types as explained below.

ORE DEPOSIT TYPES FOR PGE

Ore geologists differ in general between four main groups of ore deposits: (i) *magmatic*, meaning that the deposit formed upon the crystallization of magma, (ii) *hydrothermal*, meaning that hot water was involved in the formation of the deposit, (iii) *residual*, meaning that intense weathering of source rocks formed the deposit and (iv) *placer*, meaning that heavy ore minerals were physically concentrated due to water streams.

PGE can be found in varying concentrations in all of these four ore deposit types. However, today the vast majority of PGE are mined in different subtypes of the magmatic ore deposit type. These economically most important magmatic subtypes have in common that they are all associated with so-called large igneous provinces (LIPs) that are characterized with areal extents greater than 100 000 km² and occurring in intraplate tectonic settings.

CONVENTIONAL PGE RESOURCES

Conduit type intrusions

Noril'sk-Talnakh in Russia is an example of the conduit type (meaning that they occur in intrusions that are part of sill complexes and dike swarms; Fig. 3). The Ni-Cu-PGE ore deposits are associated with mafic magma that formed the so-called Siberian Traps, which is known as the largest continental flood basalt province on Earth (approximately 2.5 million km²).

From more than 300 intrusions mapped in the area, only about 10% have elevated sulfide concentrations. Platinum and Pd-rich sulfide mineralizations are believed to have formed via the fractionation of a sulfide melt generated by sulfur saturation of a mafic-ultramafic magma. Ore grades (Pt, Pd, Rh and Au) at Noril'sk-Talnakh are in the range of 7 g/t (Mudd *et al.*, 2018).

Reef-Type and Contact-Type Deposits

When a magma crystallizes in LIP intrusions, layering features occur, mainly due to differences in the specific weights of minerals (similar to sedimentary rocks). Within these so-called layered mafic intrusions ore mineralization can either occur as strata-bound (ore is confined to a stratigraphic unit) or stratiform (ore occurs in one or several layers).

Reef-type ("reef" is a mining term for a relatively flat-lying, tabular orebody) and contact-type (ore is found near the lower contact of mafic-ultramafic layered intrusions; Fig. 3) PGE ore deposits are strata-bound. They contain Cu-, Fe-, Ni-, and PGE-bearing minerals in form of disseminated magmatic sulfides within layers where silicates (e.g. pyroxene) and oxides (e.g. chromite) dominate. The dominance of South Africa with respect to the global PGE production mentioned above (50% of the global PGE supply) can be explained by the Bushveld Complex.

The Bushveld Complex is known as the largest known layered intrusion on Earth (on the surface it outcrops as so-called limbs in an area of ~66000 km²; i.e. eastern, western and northern limbs) that hosts the worldwide biggest PGE ore deposits (e.g. Merensky Reef, UG2 chromitite and Platreef). The average ore grade in the Bushveld complex ranges from 3 to 10 ppm total PGE (Thormann *et al.*, 2017). Other important examples of these types are the Great Dyke in Zimbabwe (ore grade ~4 ppm total PGE) and the Stillwater Complex in Montana (ore grade ~15 ppm total PGE).

Sudbury-type (impact-related)

This is currently a significant single-case type from Ontario (Canada), where the PGE mineralization is associated with the crystallization of a magma, that filled

a crater (the Sudbury basin) due to the impact of a meteorite ~1,8 million years ago.

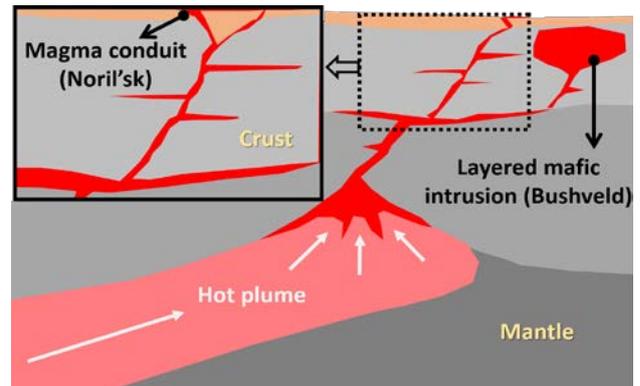


Fig 3. Simplified sketch showing the general geological setting for conventional PGE ore deposits (modified after Barnes *et al.*, 2016).

Placers

Because of their great historic importance (note that until the 1920s placers in Russia and Colombia have been the only source for PGE) placer ore deposits are accounted here to the conventional ore deposit types. Today they don't play an important role for the global PGE supply but in some developing countries artisanal (and often illegal) small-scaled mining activities occur (Fig. 4).

The formation of a PGE-bearing placer is explained by erosion processes of PGE-bearing source rocks (e.g. a magmatic intrusion) followed by the transportation of the sediments in a water stream. Due to the high specific weights of PGE-bearing minerals (e.g. "Pt-Fe nuggets"; Fig. 4) they are deposited as heavy minerals at specific locations (e.g. little basins or within the inner side of stream curves) where they can accumulate to ore grades. Placer deposits can be found in active water streams as well as in form of so-called "paleo-placers", meaning that they represent a remnant of a today inactive river or stream system.



Fig 4. Example of artisanal small-scale mining from placer sediments in South-America. Pt-bearing minerals ("Pt-Fe nuggets", labelled as "pt" in figure) and Au are concentrated via panning ("gold washing") together with other typical heavy minerals such as zircon (Zr), magnetite (Mgt), hematite (hem) and pyrite (py).

UNCONVENTIONAL PGE RESOURCES

Hydrothermal

Hydrothermal fluids (up to 300 °C) are good solvents. They can leach target metals from source rocks and transport them as complexes to where conditions are favorable for the crystallization of ore minerals. Typical hydrothermal ore deposits are for example porphyries, sedimentary exhalative (SEDEX) deposits or skarns and typical target metals from hydrothermal ore deposits are Cu, Mo, Au, Ag, Zn and Pb.

Experimental work has shown that also PGE can be mobilized in hydrothermal fluids (e.g. Colombo *et al.*, 2008). Under highly acidic and oxidizing conditions Pt and Pd can be dissolved into solutions as chloride complexes, whereas bisulfide complexes are believed to be dominant under more neutral and reduced conditions.

However, a world-class PGE ore deposit with a clear hydrothermal fingerprint for its genesis still has to be discovered. The maybe best field evidence supporting the existence of such hydrothermal PGE ore deposits are some Cu porphyries with elevated contents of PGE (especially Pt and Pd) where chloride complexes played an important role in their formation (e.g. Economou-Eliopoulos, 2005).

An example for the mobilization (and subsequent concentration) of PGE via bisulfide complexes are black shale ore deposits that also host important contents of Ni and Mo (e.g. Pasava *et al.*, 2013, 2017). Other potential hydrothermal PGE ore deposits include unconformity-related U-Au-PGE deposits, sediment-hosted strata-bound Cu deposits and ore deposits where serpentinization and metamorphism of ultramafic rocks occurred (e.g. ophiolites) (Wood, 2002).

Sedimentary

This type is rather new (a few decades) and describes the potential of marine manganese nodules and crusts to accumulate PGE during their formation. Manganese nodules and crusts form at the sides of seamounts where they can adsorb PGE (together with Ni, Co, Cu; hence they are also known as polymetallic nodules) from the seawater (Halbach *et al.*, 1989). Typical nodules have a size of a potato (up to 10 cm) and can contain PGE up to a few ppm (Hein *et al.*, 2000; Balaram *et al.*, 2006).

They occur widespread on the seafloors of our planet, which makes them attractive targets for mining activities (Fig. 5). However, as they can occur in depths down to 5-6 km such mining activities on the seafloor are currently facing significant technological and economical challenges (Glasby, 2002). Nevertheless, the potential of polymetallic nodules and seafloor crusts as future important resources for metals (including PGE) is

demonstrated by currently numerous exploration projects by different countries (licenses are provided through the International Seabed Authority) in the eastern Pacific Ocean.



Fig 5. Polymetallic nodules in a compact arrangement on the seafloor making them attractive targets for mining. Shown area is approximately 0.8 m² (modified from Schoening *et al.*, 2017).

Residual

When ultramafic rocks are exposed to tropical weathering (meaning climate-related intense physical and chemical weathering) they form specific soils that are known as laterites. During the weathering process primary minerals such as olivine and pyroxene break down and secondary minerals form. These secondary minerals (e.g. different types of Mg-phyllsilicates that are often summarized under the term “garnierites” as well as different types of Fe-oxide(s) and clay minerals; see Villanova *et al.*, 2014) can contain economic values of Ni.

Currently, Ni-laterites are hosting about 70% of the global Ni resources and they supply about 40% of the worldwide Ni (Gleeson *et al.*, 2003; Mudd 2010). There are different types of Ni-laterites that all have a common, simplified structure from bottom to top: (serpentinized) protolith (e.g. harzburgites; hard rock) is followed by a layer of saprolite (containing secondary Mg-silicates; soft rock) and a final layer of limonite (dominated by Fe-oxide(s); soil) (Fig. 6). The transition from saprolite to limonite is marked by the so-called Mg-discontinuity.

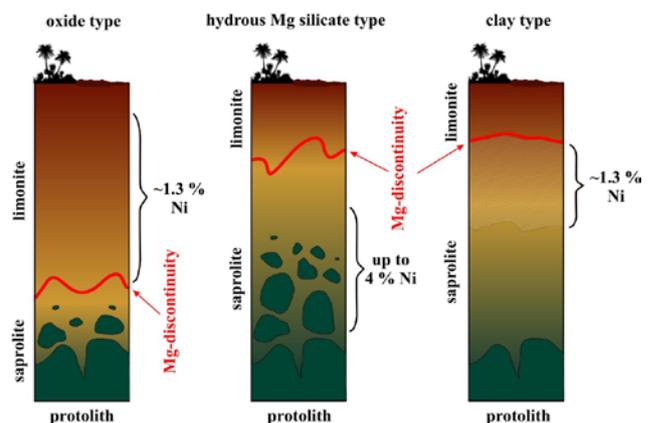


Fig 6. Subtypes of Ni laterites developed on serpentinized ultramafic protolith with indicated main Ni ore zones and grades (modified from Butt and Chuzel, 2013).

However, depending on the main ore mineralogy three types of Ni-laterites can be distinguished: (i) oxide-type, where the Ni is hosted by Fe-oxide(s) such as goethite, (ii) hydrous Mg-silicate type, where the Ni occurs mainly in before mentioned “*garnierites*”, and (iii) clay-type, where the Ni is concentrated in clay-rich layers (e.g. smectites) (Butt and Cluzel, 2013) (Fig. 6). Ni-laterites can contain other valuable metals in addition. Cobalt for example is often an important by-product in Ni-laterites of the oxide-type.

Due to the ultramafic nature of their source rocks, Ni-laterites have also a certain potential for PGE. Although little literature data is available, a few cases in the world highlight the potential of Ni-laterites as unconventional PGE resources. For example, up to 2 ppm Pt were reported from Ni-laterites from New Caledonia (Augé and Legendre, 1994).

On the other hand, processes responsible for the enrichment of PGE in the supergene environment are still matter of scientific discussion: whereas one group believes that PGE-bearing minerals found on the surface have exclusively a magmatic origin (the residual theory; meaning that PGE behave immobile), others opine that PGE can also be mobile under specific supergene conditions and form new minerals (the neoformation theory) (see Oberthür, 2018 and reference therein). A detailed investigation on the PGE geochemistry and PGE mineralogy on Ni-laterites from the Dominican Republic was led by the authors of this contribution (Aiglsperger *et al.*, 2015, 2016, 2017a, b). Different laterite profiles in the Falcondo mining area were investigated that showed highest PGE contents (up to 640 ppb compared to 50 ppb in the protolith) close to the surface.

With the aim to track down the mineralogical origin for the PGE anomaly, innovative hydrosorption techniques were applied. Hydrosorption (see www.hslab-barcelona.com for further information) simulates natural beach placers and is highly effective to concentrate heavy minerals with a grain size down to <30 µm. Hydrosorption led to the discovery of different platinum-group minerals (PGM) in all horizons of the lateritic profile that can be divided into three groups: (i) primary PGM (e.g. unaltered, euhedral laurite crystals), included in primary minerals such as chromite and believed to have formed under magmatic conditions, (ii) secondary PGM, occurring either included or as free grains with signs of alteration (e.g. altered laurite with porous textures and low S contents; believed to be a result of desulfurization processes during serpentinization) and (iii) neoformed PGM, occurring as accumulations of nanoparticles within a matrix of secondary Fe-oxide(s). Interestingly, different PGM can occur together in the form of so-called multistage grains, hence documenting the (trans-)formation processes of PGM in the studied Ni laterites (Aiglsperger *et al.*, 2017a; Fig. 7).

Following the approach by Cabral *et al.* (2011) trace amounts of iodine, which is known as a highly biophilic element, was detected in one neoformed PGM (Aiglsperger *et al.*, 2015). This points toward an involvement of biogenic processes (e.g. biofilms of microorganisms) that are likely to play a key role with respect to the mobilization and re-precipitation of PGE in Ni-laterites. Such processes may be responsible for the formation of biogenic-mediated PGM (“*growing of micro nuggets*”). These results show that a better understanding of the link between biology and mineralogy regarding PGE in the surface environment is needed, to evaluate the true potential of Ni-laterites (and other residual ore deposits). In addition, such an understanding could also help to develop innovative exploration strategies for future discoveries.

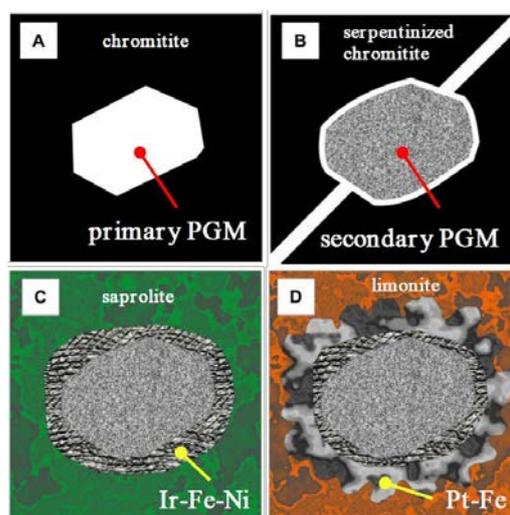


Fig 7. Cartoon showing the formation stages (A-D) of a multistage grain occurring in Ni-laterites from the Dominican Republic (see text for explanation; modified from Aiglsperger *et al.*, 2017a).

REFERENCES

- Aiglsperger, T., Proenza, J.A., Zaccarini, F., Lewis, J.F., Garuti, G., Labrador, M., Longo, F. (2015): Platinum group minerals (PGM) in the Falcondo Ni laterite deposit, Loma Caribe peridotite (Dominican Republic). *Miner. Deposita*, **50**, 105-123. <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0520-9>
- , —, Lewis, J.F., Labrador, M., Svojtka, M., Rojas-Purón, A., Longo, F., Durisová, J. (2016): Critical metals (REE, Sc, PGE) in Ni laterites from Cuba and the Dominican Republic. *Ore Geol. Rev.*, **73**, 127-147. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.10.010>
- , —, Font-Bardia, M., Baurier-Aymat, S., Galí, S., Lewis, J.F., Longo, F. (2017a): Supergene neoformation of Pt-Ir-Fe-Ni alloys: Multistage grains explain nugget formation in Ni-laterites. *Miner. Deposita*, **52**, 1069-1083. <https://doi.org/10.1007/s00126-016-0692-6>
- , —, Galí, S., Rius, J., Longo, F., Domènech, C. (2017b): The supergene origin of ruthenian

- hexaferum in Ni-laterites. *Terra Nova*, **29**, 106-116. <https://doi.org/10.1111/ter.12254>
- Augé, T. & Legendre, O. (1994): Platinum-Group Element oxides from the Pirogues ophiolitic mineralization, New Caledonia: Origin and significance. *Econ. Geol.*, **89**, 1454-1468. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.89.7.1454>
- Balaram, V., Mathur, R., Banakar, V.K., Hein, J.R., Rao, C.R.M., Gnaneswara Rao, T., Dasaram, B. (2006): Determination of the platinum-group elements (PGE) and gold (Au) in manganese nodule reference samples by nickel sulfide fire-assay and Te coprecipitation with ICP-MS. *Indian J. Mar. Sci.*, **35**, 7-16.
- Barnes, S.J., Cruden, A.R., Arndt, N.T., Saumur, B.M. (2016): The mineral system approach applied to magmatic Ni-Cu-PGE sulphide systems. *Ore Geol. Rev.*, **76**, 296-316. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.06.012>
- Butt, C.R.M. & Cluzel, D. (2013): Nickel laterite ore deposits: Weathered serpentinites. *Elements*, **9**, 123-128. <https://doi.org/10.2113/gselements.9.2.123>
- Cabral, A.R., Radtke, M., Munnik, F., Lehmann, B., Reinholz, U., Riesemeier, H., Tupinambá, M., Kwitko-Ribeiro, R. (2011): Iodine in alluvial platinum-palladium nuggets: Evidence for biogenic precious-metal fixation. *Chem. Geol.*, **281**, 125-132. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.12.003>
- Colombo, C., Oated, C.J., Monhemius, A.J., Plant, J.A. (2008): Complexation of platinum, palladium and rhodium with inorganic ligands in the environment. *Geochem. Explor. Environ. Anal.*, **8**, 91-101. <http://dx.doi.org/10.1144/1467-7873/07-151>
- Economou-Eliopoulos, M. (2005): Platinum-group element potential of porphyry deposits. in "Exploration for platinum-group element deposits", J.E. Mungall, ed. Mineralogical Association of Canada, Short Course Series 35, Quebec, Canada, 203-245.
- European Commission (2017): Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on the 2017 list of Critical Raw Materials for the EU. COM/2017/0490 final. European Commission, Brussels, Belgium, 8 p. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2017:0490:FIN> [consulta: 12 abril de 2019].
- Glasby, G. P. (2002): Deep seabed mining: past failures and future prospects. *Mar. Georesour. Geotec.*, **20:2**, 161-176. <https://doi.org/10.1080/03608860290051859>
- Gleeson, S.A., Butt, C.R., Elias, M. (2003): Nickel laterites: a review. *Society for Economic Geologists Newsletter*, **54**, 11-18.
- Halbach, P., Kriete, C., Prause, B., Puteanus, D. (1989): Mechanisms to explain the platinum concentration in ferromanganese seamount crusts. *Chem. Geol.*, **76**, 95-106. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(89\)90130-7](https://doi.org/10.1016/0009-2541(89)90130-7)
- Hein, J.R., Koschinsky, A., Bau, M., Manheim, F.T., Kang, J.K., Roberts, L. (2000): Cobalt-rich ferromanganese crusts in the Pacific. in "Handbook of marine mineral deposits", D.S. Cronan, ed. CRC Press, Boca Raton, Florida, 239-279. <https://doi.org/10.1201/9780203752760>
- Mudd, G.M. (2010): Global trends and environmental issues in nickel mining – Sulfides versus laterites. *Ore Geol. Rev.*, **38**, 9-26. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.05.003>
- , Jowitt, S.M., Werner, T.T. (2018): Global platinum group element resources, reserves and mining – A critical assessment. *Sci. Total Environ.*, **622-623**, 614-625. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.350>
- Juan, J. & Ulloa, A. de (1748): Relación histórica del viaje a la América Meridional. A. Marín, Madrid. Vol. I, 606 p. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.156863>
- Oberthür, T. (2018): The fate of platinum-group minerals in the exogenic environment—from sulfide ores via oxidized ores into placers: case studies Bushveld Complex, South Africa, and Great Dyke, Zimbabwe. *Minerals*, **8**, 581. <https://doi.org/10.3390/min8120581>
- Pašava, J., Zaccarini, F., Aiglsperger, T., Vymazalová, A. (2013): Platinum-group elements (PGE) and their principal carriers in metal-rich black shales: an overview with a new data from Mo-Ni-PGE black shales (Zunyi region, Guizhou Province, south China). *J. Geosci.*, **58**, 209-216. <http://dx.doi.org/10.3190/jgeosci.147>
- , Ackerman, L., Halodová, P., Pour, O., Ďurišová, J., Zaccarini, F., Aiglsperger, T., Vymazalová, A. (2017): Concentrations of platinum-group elements (PGE), Re and Au in arsenian pyrite and millerite from Mo-Ni-PGE-Au black shales (Zunyi region, Guizhou Province, China): results from LA-ICPMS study. *Eur. J. Mineral.*, **29**, 623-633. <https://doi.org/10.1127/ejm/2017/0029-2640>
- Schoening, T., Jones, D.O.B., Greinert, J. (2017): Compact-morphology-based poly-metallic nodule delineation. *Sci. Rep.*, **7**, 13338. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13335-x>.
- Thormann, L., Buchspies, B., Mbohwa, C., Kaltschmitt, M. (2017): PGE production in Southern Africa, part I: production and market trends. *Minerals*, **7**, 224. <https://doi.org/10.3390/min7110224>
- U.S. Geological Survey (2016): Mineral commodity summaries 2016. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, USA, 202 p. ISBN 978-1-4113-4011-4. <https://doi.org/10.3133/70170140>
- Villanova-de-Benavent, C., Proenza, J.A., Galí, S., García-Casco, A., Tauler, E., Lewis J.F., Longo, F. (2014): Garnierites and garnierites: Textures, mineralogy and geochemistry of garnierites in the Falcondo Ni laterite deposit, Dominican Republic. *Ore Geol. Rev.*, **58**, 91-109. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.10.008>
- Wood, S.A. (2002): The aqueous geochemistry of the platinum-group elements with applications to ore deposits. in "The geology, geochemistry, mineralogy and mineral beneficiation of platinum-group elements", L.J. Cabri, ed. Canadian Institute of Mining Metallurgy and Petroleum, Special Volume 54, Montreal, Quebec, Canada, 211-249.

La fluorita como *Critical Raw Material*. El ejemplo de Mina Lújar (Órgiva, Granada).

Celso Amor Castillo (1), Rafael Navarro Domínguez (1*), Andrey Ilin Maximovich (2)

(1) Minera de Órgiva S.L., Mina Carriles Polígono 13, Parcela 1, 18400, Órgiva. Granada (España)

(2) Departamento de Mineralogía y Petrología. Universidad del País Vasco (UPV/EHU), 48940, Leioa, Bizkaia (España)

* corresponding author: rafa.navarro@mineradeorgiva.com

Abstract:

Fluorite (or fluorspar) is considered as a Critical Raw Material (CRM) by European Union since 2010. Therefore, this mineral is fundamental in the strategy which aims to the reduction of the dependence upon external providers and also to enhance the local economies of the Union's members. In addition, due to the generalized depletion of the classic ore deposits in Europe or because of its proximity to the populated areas, it also seeks to access the raw material which were not traditionally considered as such by cause of technical complexity which would imply its mining (e.g. deep deposits, remote or highly populated areas, former mines, low grade deposits). Given this context, the fluorite mining in Pb-F-(Zn) ore deposit, which is actively developed by Minera de Orgiva, S.L. in Lujar Mountain Range since 2010, is a precise example of the latter. It is an ancient underground mine following narrow veins which has a great intricacy of both geological setting and ore treatment. Nevertheless, in spite of huge technical and environmental challenges, the recovery of mining operations made an important economic revival in the district and also grants an excellent example of sustainable mining for European Union.

Resumen:

La fluorita (o espatofluor) está considerada desde 2010 por la Unión Europea (UE) como materia prima crítica (*Critical Raw Material*, CRM), por lo que es un mineral fundamental en la estrategia de reducir la dependencia exterior, mejorando así las economías locales de los Estados miembros de la UE. Asimismo, debido al agotamiento generalizado de los grandes yacimientos minerales en Europa o la cercanía de la mina a áreas pobladas, se busca prioritariamente el acceso a yacimientos minerales de materias primas tradicionalmente no considerados como tales por estar ubicados en lugares técnicamente difíciles (e.g. grandes profundidades, áreas remotas, zonas pobladas, antiguas minas o depósitos de baja ley). La explotación de fluorita que está desarrollando Minera de Órgiva, S.L. en la Sierra de Lújar en un yacimiento de Pb-F-(Zn) desde 2010 es un claro ejemplo de lo anterior. Se trata de una mina antigua, subterránea, de filón estrecho, con una estructura geológica muy compleja y de difícil tratamiento. Sin embargo, la explotación de esta mina, con grandes retos técnicos y medioambientales, ha supuesto una importante inyección económica en la comarca, siendo además un ejemplo de explotación sostenible para la Unión Europea.

Palabras Clave: Fluorita, Espato-Flúor, Materias Primas Críticas, Minería Sostenible, Metalurgia, Lújar. | **Key Words:** Fluorite, Fluorspar, Critical Raw Material, Sustainable Mining, Metallurgy, Lújar.

INTRODUCCIÓN

La fluorita (CaF_2), o espatofluor (*fluorspar*) en su nombre comercial (Fig. 1), es un mineral que industrialmente tiene una gran importancia como principal mena del flúor, siendo de gran utilidad en la industria química y metalúrgica.

La fluorita se comercializa en varios tipos de concentrado:

- Grado ácido (97% CaF_2 mínimo). Usada para la obtención del ácido fluorhídrico, básico para el desarrollo de la criolita sintética y del fluoruro de aluminio. Tiene múltiples aplicaciones en sectores como el petroquímico, farmacéutico, electrónico, el vidrio o la industria agroquímica.



Fig. 1. Ejemplar de fluorita de Mina Lújar.

- Grado cerámico (93-95% CaF₂). Utilizada como opacificador y clarificador de ópalo, vidrio y esmaltes.
- Grado metalúrgico (>70% CaF₂). Usada en la manufactura del acero para mejorar las características de las escorias, especialmente para reducir la tensión superficial, minimizar las variaciones en la viscosidad con la temperatura de fusión, disminuir la temperatura de fusión y mejorar la fluidez y, por tanto, las propiedades de transferencia de calor. Con esto se consigue facilitar y acelerar la formación de escoria, reduciendo así el coste energético. Se reducen así las pérdidas calóricas y mejora el rendimiento térmico durante las fases de calentamiento del horno y el afino. Por otra parte, una escoria con punto de fusión bajo tiene mayor capacidad para captar sulfuros en la desulfuración, mayor capacidad reductora y captadora de inclusiones, resultando un acero más limpio.
- Grado cementero (>35% CaF₂). En la industria del cemento el uso de la fluorita reduce el consumo de energía térmica al bajar la temperatura de clinkerización, además de incrementar la resistencia a la compresión en un 15 %.

Actualmente, los principales productores de fluorita metalúrgica son China, México, Mongolia y Vietnam (Trio y Guillermo, 2017).

La fluorita actualmente se encuentra incluida dentro de las veintisiete materias primas consideradas como críticas (conocidas como *Critical Raw Material* en la bibliografía en inglés, o como CRM por su abreviatura), que son fundamentales para la Unión Europea (UE), dado que los riesgos de escasez de suministro y los efectos que ejercen sobre la economía son más importantes que los de la mayoría de las demás materias primas (European

Commission, 2017a). Fue incluida en la primera lista de CRM en 2010 (European Commission, 2011), que contemplaba un total de 14 sustancias, y en sus actualizaciones de 2014 y 2017 (European Commission, 2014a, 2017a). Esto es indicativo de que la Unión Europea se plantea una estrategia común para reducir la dependencia exterior de materias primas críticas, entre las cuales, se encuentra la fluorita. De hecho, con esta política de declaración de CRM, se espera incrementar la competitividad global de la economía de la UE, en línea con la aspiración de aumentar la contribución del sector al PIB en hasta un 20% en 2020. La lista también ayuda a incentivar la producción europea de materias primas fundamentales, facilita la puesta en marcha de nuevas actividades mineras y se utiliza para contribuir a determinar las necesidades y acciones prioritarias (European Commission, 2014a).

En la Tabla 1 se muestran las características principales de la fluorita como CRM, según las consideraciones de la Unión Europea. El “índice de dependencia de las importaciones”, utilizado en el cálculo del riesgo del suministro, tiene en cuenta el suministro mundial y las fuentes de suministro reales de la UE. Este índice se calcula como la razón entre las importaciones a la UE netas y la suma de las importaciones a la UE netas más la producción interna de la UE. El “índice de sustitución” mide la dificultad para sustituir el material, teniendo en cuenta la importancia económica (IE) y el riesgo del suministro (RS). Los valores se sitúan entre 0 y 1, donde 1 indica la menor sustituibilidad. El “índice de aporte del reciclado al final de su vida útil” mide el índice de reciclado de metales viejos respecto a la demanda de la UE de una determinada materia prima, siendo la demanda igual al suministro de la UE de materias primarias y secundarias (Regueiro, 2014; European Commission, 2017b).

<i>Principales productores mundiales (media 2010-2014)</i>	<i>Principales importadores a la UE (media 2010-2014)</i>	<i>Fuentes de suministro de la UE (media 2010-2014)</i>	<i>Índice de dependencia de las importaciones para la UE</i>	<i>Índices de sustitución IE/RS</i>	<i>Índice de aporte del reciclado al final de su vida útil</i>
China (64 %) México (16 %) Mongolia (5 %)	México (38 %) China (17 %) Sudáfrica (15 %) Namibia (12 %) Kenia (9 %)	México (27 %) España (13 %) China (12 %) Sudáfrica (11 %) Namibia (9 %) Kenia (7 %) Alemania (5 %) Bulgaria (4 %) Reino Unido (4 %) Otros países de la UE (1 %)	70 %	0.98 / 0.97	1 %

Tabla 1. Características principales de la fluorita como CRM (European Commission, 2017b). IE: importancia económica; RS: riesgo del suministro.

La UE tiene un gran interés en reforzar el sector industrial de la economía europea. Esto se debe principalmente a la alta calidad de los empleos industriales y al hecho de que la economía debe estar bien equilibrada entre los diferentes sectores económicos, considerando los sectores primario, secundario y terciario. Para cumplir los objetivos de la estrategia del Programa Marco de Investigación e Innovación de la Unión Europea (Horizonte 2020) (European Commission, 2014b) e impulsar un crecimiento económico sostenible, las economías de la UE necesitan asegurar su acceso a materias primas estratégicas. Como es sabido, estas son esenciales para mantener un fuerte crecimiento industrial. La principal preocupación en este sentido es la alta dependencia externa que la UE tiene hoy en día en las materias primas. Esta elevada dependencia de las importaciones de CRM, como la fluorita, así como su elevado índice de sustitución, hace que explotaciones como las de la “Mina Lújar” y el trabajo de investigación de otras zonas mineras, como las que actualmente se está llevando a cabo por Minera de Órgiva, S.L., tengan una alta importancia de cara a reducir la dependencia exterior de esta sustancia, contribuyendo a la mejora de la economía a todos los niveles.

Minera de Órgiva, S.L. es la actual titular de la concesión de explotación “Lújar” nº30411, de 8 cuadrículas mineras para la explotación de fluorita, plomo y zinc, en el término municipal de Órgiva (Granada), y cuenta además con varios permisos de investigación minera para fluorita, plomo y zinc en Sierra de Lújar (“Lújar Sur” nº30785, “Lújar Norte” nº30798) y Sierra de Gádor (“Lupiión” nº40644), o para barita y plomo (Grupo Minero “Los Guindos”, en La Carolina –Jaén-), entre otros.

LA MINA LÚJAR: CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICO-MINERAS

Evolución histórica de la Mina Lújar

La actividad minera en la Sierra de Lújar se viene desarrollando de forma más o menos continuada desde hace más de 2700 años. Los primeros testimonios de explotación del plomo datan del siglo VII-VI a. C. (ENADIMSA, 1986). Hay también referencias a explotaciones por parte de los romanos, según se acredita por Estrabón en su libro Geografía, que señala la existencia de minas de oro y de otros metales en las sierras que separan de la Bastetania mediterránea o interior el litoral de Málaga, Almuñécar y Adra (Costa, 1895). Madoz (1850), cita en su Diccionario geográfico-estadístico-histórico de España y sus posesiones de ultramar que, “*en la sierra de Lújar, además de las minas recientes, merece una particular atención la mina llamada de Bobelo, que se explotaba como muchas otras de la sierra en tiempos de los romanos, según vienen a testificarlo los utensilios y monedas que en ella se encuentran*”. También está bien documentada la existencia de labores mineras entre los siglos IX y X,

correspondiente a la época de Abd al-Rahman III (921-961), mediante la datación de vestigios mineros (candiles) en la Sierra de Lújar, localizados en la parte sur de la Sierra (Pérez-Salguero, 2017). Todas estas labores antiguas, según todos estos autores, son dispersas, discontinuas y modestas, ya que las mineralizaciones se disponen en bolsadas o en filones de “frente y de cabeza”, que luego se cortan y desaparecen, por lo que la Sierra de Lújar no constituye un gran centro de producción de plomo, a diferencia de las áreas de Gádor o Linares. Sin embargo, estas explotaciones, en manos locales, daban trabajo a gran cantidad de vecinos, bien como jornaleros, bien como rebuscadores, lo que se conocía como “macagueros” (Cohen, 2002). No es hasta el s. XIX cuando se generaliza la extracción de recursos en la zona. Esas primeras explotaciones se realizaron al amparo de la Ley de Minería de 1825 mediante la cual, aunque las minas pertenecían a La Corona, se permitía el acceso a las concesiones a particulares. En 1842 había 59 minas de plomo y 5 de plata en explotación, aunque solamente 22 rendían productos. La más rica de ellas explotaba entre 10.000 y 11.000 arrobas de mena mensuales (unas 120 toneladas/mes). Estos metales se fundían en los tres hornos de reverbero que existían en la sierra, dos en Órgiva y uno en Vélez de Benaudalla (Madoz, 1850). Sin embargo, en 1866, tan solo quedaban 16 minas activas, con una producción total de unas 276 toneladas de concentrado de plomo en conjunto, la menor desde que se tenía registro. Durante todo el resto del siglo XIX, la producción continúa con grandes altibajos, derivados de la falta de un sistema adecuado de explotación y de la falta de capital. A finales del s. XIX y a principios del XX, una caída generalizada a nivel global de los precios del plomo hunde la producción del plomo de la Sierra de Lújar, quedando en 1881 tan solo entre cuatro y seis concesiones activas en Órgiva y entre dos y tres en Vélez de Benaudalla, respectivamente (Cohen, 2002). No obstante, a pesar de esta caída de la producción, la Sierra de Lújar resiste mejor que otras comarcas mineras como la Sierra de Baza o Gádor. En 1900, la Sierra de Lújar albergaba la práctica totalidad de la explotación de plomo de la provincia, aunque con grandes carencias técnicas. El sistema de minifundismo de mitad del s. XIX poco a poco se va transformando con la entrada de familias adineradas en la titularidad de las concesiones. Hacia finales del s. XIX, se funda la empresa “Minas y plomos de la sierra de Lújar”, participada tanto por la familia Huelín (de Málaga) como por la familia Rodríguez-Acosta (de Granada), y en 1907 nombran como ingeniero-director al belga Louis de Pelsmaeker. En esta etapa, se unifican muchos registros mineros y se descubren nuevas zonas, permitiendo el desarrollo de una planificación minera más ordenada. Se realizan nuevas investigaciones y se descubren nuevas áreas de explotación, como las zonas de San Luis, que será el principal foco de explotación en esos años, o San Isidro. Se estima que entre 1908 y 1934 se extrajeron 85.000 toneladas de galena, con una ley media del 68% en el concentrado (Cohen, 2002). La crisis generalizada de los años 30 del s. XX, con una fuerte caída en el

precio del plomo, desembocó en la venta de la compañía y las concesiones en 1935 a la Compañía Metalúrgica de Mazarrón, que, a su vez, cedió en arriendo las minas a la Sociedad Minero-Metalúrgica de Peñarroya.

Entre 1935 y 1951 prácticamente no se desarrolló ningún tipo de labor en la mina, con excepción de algunas tareas de desescombro e investigación, debido principalmente a la dificultad del transporte del mineral. Al final se opta por instalar la planta de tratamiento (Fig. 2a) en la localidad de Los Tablones, anexa a Órgiva, y un cable aéreo (Fig. 2b) para transportar el mineral procedente de la mina y de las antiguas escombreras desde la bocamina “Carriles” hasta la planta, con capacidad de 200 toneladas/día. El transporte por el interior de la mina se realizaba mediante vagonetas (Fig. 2c) con tracción animal, siendo en algunas ocasiones los mismos mineros los que empleaban sus propias fuerzas en los trayectos más cortos. La perforación se realizaba mediante cincel y martillo con barrenos de 20 a 40 cm que eran cargados con pólvora y detonados mediante mecha lenta. Años más tarde se incorporaron locomotoras, para sustituir a la caballería en las galerías principales, y el aire comprimido para mejorar las técnicas de perforación (Amor y Navarro, 2016). A partir de los años 60, la Sociedad Minero-Metalúrgica de Peñarroya se plantea el beneficio de fluorita, por lo que se realizan instalaciones eléctricas y de agua para poder incrementar los ritmos de explotación. Asimismo, con el objetivo de facilitar el transporte del mineral, se construye el carril de acceso desde Tablones y a la práctica totalidad de las más de cincuenta bocaminas existentes en la actualidad. Además, la adquisición de maquinaria minera específica (Cargadoras de Transporte y Descarga -conocidas como L.H.D. por su abreviatura en inglés, *Load Haul Dump*-) permite modernizar los sistemas de explotación y transporte e incrementar la sección de las galerías, pasando de secciones de 2.5 m² a 4.5 m². Respecto a la producción de fluorita, inicialmente se empieza a producir en grado metalúrgico, y a partir de 1978, se comienza a considerar la obtención de fluorita en grado ácido. Para ello, se desarrolla una nueva planta de flotación diferencial de fluorita-galena para la obtención de concentrado > 97% de CaF₂ en grado ácido, que se prolonga hasta 1983, momento en que una crisis internacional de precios desemboca en la bajada de las exportaciones y en la casi paralización de la actividad minera en 1985 (Cohen, 2002; Amor y Navarro, 2016). El 5 de agosto 1989 se para la planta de flotación de forma definitiva para no volver a arrancar y, con ella, la mina.

En 1998 se crea la sociedad “Minera de Órgiva S.L.” que consigue, en 1999, la Concesión de Explotación “Lújar” nº 30411, de ocho cuadrículas mineras, de acuerdo con la Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas. Abarca parte de las estructuras principales e históricas de todas las minas de la Sierra de Lújar. En estos años, apenas realiza actividades extractivas, ciñéndose a la extracción ocasional de galena. En 2010 se produce un cambio en



Fig. 2. a) Instalaciones de tratamiento del mineral de S.M.M. Peñarroya en Tablones (Órgiva) a mitad del s. XX. b) Vista del antiguo cable aéreo para el transporte del mineral. c) Vagoneta y sistema de railes empleado, que aún se conservan en algún sector de la mina. Fotografías a) y b), cedidas por el Ayuntamiento de Órgiva (Granada).

su accionariado, retomándose la actividad minera de forma ininterrumpida y creciente hasta la actualidad, extrayéndose principalmente fluorita en grado metalúrgico, aunque con previsiones de obtener fluorita en grado ácido en 2020. En estos años de actividad, se ha incrementado notablemente tanto el personal de la mina, pasando de 11 trabajadores en el año 2011 a los 53 actuales, como la inversión (600.000 € en 2018). Además, la política de la empresa es contar al máximo con proveedores locales. De los 4 millones de euros de gastos generales de explotación y tratamiento en 2018, aproximadamente un 15% repercutieron de forma directa en Órgiva y otras localidades cercanas. En la provincia de Granada, el total del gasto realizado fue del 50%.

La producción de fluorita se ha ido incrementando prácticamente todos los años, pasando de las 400 toneladas en 2011 hasta las 42.700 toneladas en 2018, tanto de fluorita en grado metalúrgico como en grado cementero. Es importante resaltar que esta empresa no cuenta con socios o capital extranjero, o de grandes compañías, siendo una empresa PYME de carácter local.

Contexto geográfico y geológico

Geográficamente, la Mina Lújar se encuentra situada en la Sierra de Lújar, en el término municipal de Órgiva (Granada). La Sierra de Lújar se encuentra en la parte meridional de la provincia de Granada, conformando una sierra de una altura superior a los 1.850 m que delimita el valle de la Alpujarra de la Hoya de Motril – Salobreña.

Desde el punto de vista geológico, se ubica en el Complejo Alpujárride (Zonas Internas de las Cordilleras Béticas). Concretamente, pertenece al manto de Lújar (Fig. 3), que constituye la unidad o manto inferior de cuantos componen este Complejo, que se ubica directamente por encima del Complejo Nevado-Filábride (Roldán, 2011).

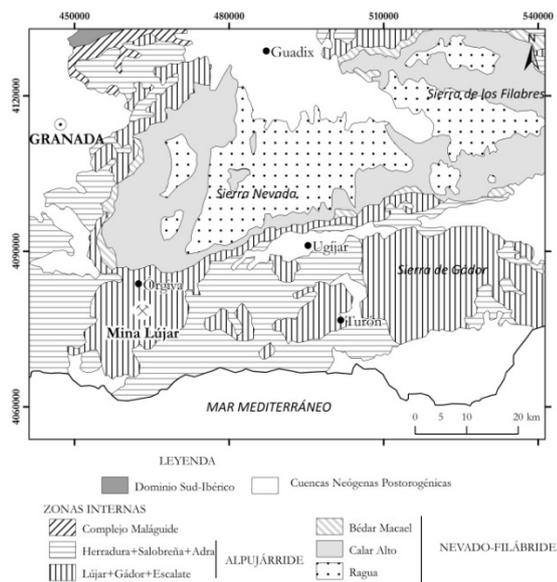


Fig. 3. Localización y esquema geológico del área de estudio. Modificado de Roldán (2011).

Estratigráficamente, la serie tipo Alpujárride consiste en un basamento metamorfozado (Paleozóico o anterior) de micaesquistos y cuarcitas, y una cobertera permotriásica, compuesta por una unidad inferior metapelítica (Pérmico-Triásico inferior) y una formación carbonatada suprayacente de edad Triásico medio-superior, con intercalaciones de metabasitas a lo largo de toda la serie (Martín *et al.*, 1984).

En conjunto, los depósitos estratoligados de F-Pb-(Zn) del Complejo Alpujárride se formaron en una cuenca marina somera con una notable inestabilidad, que se pone de manifiesto por la frecuente presencia de brechas y pliegues intraformacionales o intrusiones de diabasas (Ovejero *et al.*, 1982). Se encuentran en dos posiciones estratigráficas muy definidas dentro de la formación carbonatada, que puede tener hasta 1.200 metros de potencia. La primera, de edad Anisiense (Triásico medio), está relacionada con una transgresión y el paso de un *lagoon* restringido y aislado por una barrera calcarenítica, mientras que la segunda se localiza en el tránsito de Ladiniense superior a Carniense inferior (Triásico medio-superior) y muestra la situación inversa, es decir, de somerización (Martín *et al.*, 1987).

La morfología de los cuerpos mineralizados puede ser estratiforme, paleokárstica o relleno de diaclasas, siendo la primera más importante volumétricamente (Fontboté y Gorzawski, 1988).

En la Fig. 4 se muestra la columna de síntesis de la Sierra de Lújar y de la serie de la Mina, las cuales se describen a continuación.

Desde un punto de vista estratigráfico, Sanz de Galdeano y López-Garrido (2014) separan la serie de la Sierra de Lújar en seis miembros diferentes. El inferior (Miembro 1) está formado por filitas, que pueden localmente llegar a esquistos de grano fino y presentar intercalaciones finas de cuarcitas, yeso y calcoesquistos. El muro no es observable, pero se estima que el espesor es de varias centenas de metros y de edad de Permo-Werfaniense a Anisiense (Martín *et al.*, 1984). Subiendo en la serie, se observa una transición progresiva de filitas a calcoesquistos amarillos con sericita, intercalaciones de caliza, dolomía y lentejones de yeso (primario, propio de un ambiente somero con intensa evaporación), además de brechas intraformacionales y *slumps*. Este Miembro 2 presenta una gran variación en espesor, desde pocos metros hasta 75 m. Por encima se sitúan dolomías oscuras atribuidas al Miembro 3. Mayoritariamente son masivas, pero localmente aparecen laminadas o cebradas y con intercalaciones de margas, pudiendo estar mineralizadas con pequeñas cantidades de galena, aunque sin interés extractivo. La edad de los miembros 2 y 3 es Anisiense-Ladiniense (Martín *et al.*, 1984) y tienen un espesor de 350-450 m. Por encima se hallan calizas criptocristalinas de tonalidades grises a negras (Miembro 4), separadas del miembro anterior por un nivel de calcoesquistos. Además, presenta unas intercalaciones de dolomías que contienen materia orgánica, pirita idiomorfa, calcedonia y caolinita. La alteración de la roca fresca, visible por la limonitización de la pirita y la pérdida de magnesio, da lugar a la dolomía marrón (Ovejero *et al.*, 1982). Asimismo, se observa la dolomía con textura cebrada (también llamada “franciscana”), formada por la alternancia de bandas oscuras constituidas por los cristales más finos, y bandas claras de cristales más grandes y crecimiento en empalizada. Alternativamente, en algunas zonas se encuentra en la dolomía una estructura geopetal, formada por tres bandas, que de muro a techo presenta los colores gris, negro y blanco (Ewert, 1976). Esta alternancia se ha considerado tradicionalmente en la mina como el principal criterio de polaridad estratigráfica (Ovejero *et al.*, 1982). Localmente abundan los nódulos de sílex de colores blanco, gris o negro. Tiene una potencia de alrededor de 200 m y su edad es Ladiniense superior - Carniense inferior. De manera semejante, el Miembro 5 aparece aislado del anterior por un nivel de calcoesquistos. Litológicamente es muy parecido al infrayacente, presentando niveles discontinuos de dolomías oscuras intercalados entre margocalizas. Las brechas y *slumps* son más abundantes. La potencia es de alrededor de 150 m y la edad es Carniense. Cabe destacar que en estos dos últimos miembros se encuentran las mayores mineralizaciones de Pb-F-(Zn) de esta zona. Además, ligados a los miembros 3, 4 y 5 aparecen unos niveles de diabasas frecuentemente muy alteradas, que químicamente se asemejan a una andesita (Ewert, 1976).

Por último, la serie se culmina con el Miembro 6 formado por dolomías de color gris a gris oscuro, laminadas y con abundantes estructuras algales en su interior. Se reconocen las facies de *lagoon*, de arrecife y de *foreereef* marcadas por distintos tipos de dolomías (Martín *et al.*, 1984). Tiene un espesor observado de 200 m -la falta de conservación del miembro suprayacente impide la estimación de potencia original- y es de edad Carniense superior-Noriense inferior.

Con respecto a la mineralización, la zona de interés extractivo se localiza en un tramo de unos 200 m. de espesor, constituido por calizas y horizontes dolomíticos interestratificados (principalmente dos), de morfología, extensión y contenido en Pb-F-(Zn) variables, que pertenecerían al Miembro 4.

Los niveles dolomíticos inferiores (Miembro 3), de edad Anisiense, en la Sierra de Lújar están poco mineralizados, habiéndose encontrado algo de galena sólo muy puntualmente, a diferencia de lo que ocurre en la Sierra de Gádor, de características geológicas muy semejantes (Fenoll *et al.*, 1987), aunque hay que indicar que han sido poco investigados.

En detalle, este tramo está formado por calizas grises, criptocristalinas, con juntas de estratificación arcillosas rojas o amarillas, ocasionalmente negras, o bien niveles de calizas blanquecinas de aspecto marmóreo. Entre estas calizas se intercalan los horizontes dolomíticos mineralizados. Son dolomías grises oscuras a negras, con frecuentes zonas con una textura cebrada característica. Hacia techo las dolomías se reducen a horizontes discontinuos y débiles, ocasionalmente bien mineralizados, especialmente en fluorita.

De acuerdo con Ovejero *et al.* (1982), las mineralizaciones se sitúan en un conjunto de facies caracterizado por relaciones geométricas siempre complejas. Las discordancias menores abundan, pero no puede situarse en ninguna parte una discordancia cartografiada neta a la escala de la sierra. No se trata pues de mineralizaciones “*sous inconformité*” (Callahan, 1967) sino más bien de mineralizaciones ligadas a una suma de discordancias menores, reflejando una paleotopografía compleja y dinámica. Esta paleotopografía presentaría altos fondos, localmente emergidos (islotas), alrededor y sobre los cuales se han distribuido y han evolucionado los diferentes tipos de mineralizaciones existentes.

A nivel estructural, Ovejero *et al.* (1982) describen que la mina está ubicada dentro de un anticlinal, con un flanco N invertido y vergente hacia NW (Figs. 5a y 5b). Los bordes S y E de la sierra aparecen delimitados por un gran sinclinal invertido vergente hacia su interior y cuyo eje es curvado, variando la dirección de E-W a NNE (Sanz de Galdeano y López-Garrido, 2014). La dirección de plegamiento más abundante es la de NNE-SSW/N-S, que es fruto de la traslación de la Zonas Internas hacia el

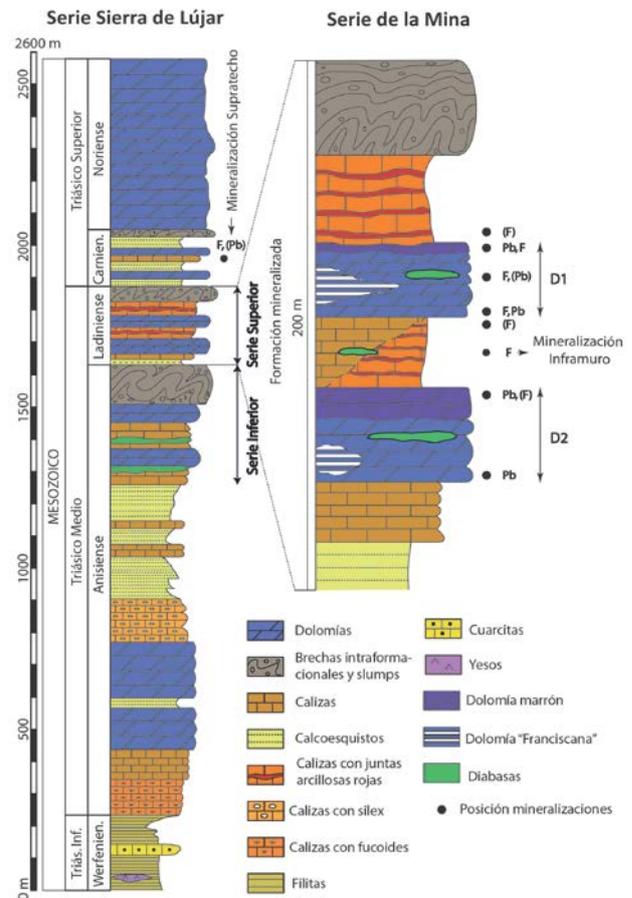


Fig. 4. Columna estratigráfica de la Sierra de Lújar y de la serie de la Mina, con indicación de la posición de los niveles mineralizados. Modificado a partir de Reolid (2017).

W, que se superpone a otras de dirección E-W formados durante el cabalgamiento de las unidades. Además, el anticlinal aparece afectado por una serie de fracturas contemporáneas con el plegamiento.

Características del yacimiento

En la Sierra de Lújar, la mineralización de fluorita y plomo es una mineralización estratiforme o estratoligada, considerada tradicionalmente como de carácter sedimentario/diagenético (Ovejero *et al.*, 1982; Fenoll *et al.*, 1987), aunque investigaciones recientes han puesto de manifiesto un posible origen hidrotermal, en base a datos de inclusiones fluidas y espectroscopía Raman (Ilin, 2018). Es considerado tipo Alpino, aunque también es frecuente encontrar una mineralización de tipo “filoniano” (s.l.) ligada a zonas de fractura. Dentro de los yacimientos de tipo Mississippi Valley (MVT), Sangster (1990) define los yacimientos Alpinos como un subtipo que presenta características muy similares a los MVT americanos pero las mineralizaciones están encajadas en carbonatos paleozóicos o triásicos de los orógenos Apalachiano o Alpino. Las principales diferencias corresponden a que son más calientes, encajan en materiales carbonatados deformados y los depósitos tienen un marcado control estructural (zonas de *rifting* o colisión), en comparación con los MVT clásicos. En

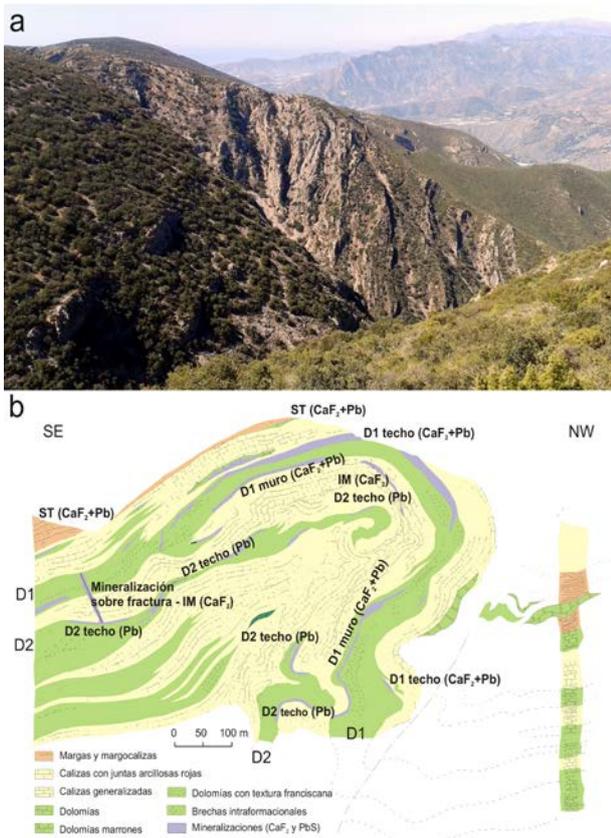


Fig. 5. a) Panorámica característica de la estructura de la parte norte de la Sierra de Lijar. b) Corte geológico esquemático de la serie de la Mina Lijar, con indicación de la posición de las principales mineralizaciones. ST: Supratecho; D1: horizonte dolomítico superior; IM: Inframuro; D2: horizonte dolomítico inferior. Modificado de Ovejero et al. (1982).

ocasiones, se asocian a fenómenos de emersión-karstificación desarrollados durante una determinada orogenia. En otros casos, pueden ser removilizaciónes tectónicas de antiguos yacimientos MVT (Tritlla et al., 2006).

En detalle, los dos horizontes dolomíticos más conocidos, presentan las siguientes características:

- El horizonte dolomítico D2 es de potencia muy irregular (0 a 70 m.) y llega con frecuencia a desaparecer. Presenta frecuentemente discordancias locales con las calizas del techo y del muro. La mineralización (especialmente galena) se sitúa casi constantemente hacia el techo del horizonte, sobre dolomías marrones muy alteradas. También puede contener fluorita de interés económico.
- El horizonte dolomítico D1 está estratigráficamente por encima del D2. Entre ambos hay calizas grises con juntas arcillosas rojas de espesor muy variable (entre algunos metros y 60 m) y calizas grises masivas. Su potencia varía entre 10 y 80 m., pero se mantiene frecuentemente dentro de los 45-50 m. Su continuidad lateral es mayor que la del D2. Las mineralizaciones (F-Pb) se sitúan a techo y muro y muy ocasionalmente en la parte media.

La potencia de los niveles mineralizados de interés es muy variable, incluso en áreas muy cercanas. Puede pasar en pocos metros desde 4-5 metros a varios centímetros, o incluso desaparecer. En general, varía entre unos pocos centímetros y unos 12 metros. Frecuentemente se cumple que, a mayor potencia, mayor ley dentro de un mismo horizonte. Actualmente, con los condicionantes económicos actuales de laboreo y tratamiento, la potencia mínima económicamente explotable se estima en 1.2 metros. En general, la ley media es del 35% en fluorita y del 2% en plomo, aunque varía enormemente entre unos sectores y otros.

Además de estos horizontes más o menos interestratificados, es frecuente la aparición de otras zonas mineralizadas denominadas:

- Supratecho (ST): Está por encima del D1 y se localiza en los lentejones dolomíticos que aparecen intercalados ocasionalmente entre las calizas y margas del Carniense. Son mineralizaciones de potencia muy variable (entre varios centímetros y hasta 2 metros), de poca continuidad lateral.
- Inframuro (IM): Se denomina mineralización inframuro a un tipo de mineralización de tipo “filoniano” (s.l.) que aparece principalmente entre los niveles D1 y D2. Es una mineralización principalmente de fluorita, ligada a una extensa red de fracturas de dirección variable, y que pueden alcanzar hasta 8-10 m de potencia.

La mineralización de fluorita puede aparecer con diferentes aspectos (Fig. 6):

- Fluorita conocida como “piedra india”, constituida por alternancia rítmica de fluorita blanca y fluorita negra, presentando en corte vertical un aspecto cebrado característico.
- Fluorita blanca-violeta bien cristalizada, de pequeño tamaño (cristales generalmente milimétricos), presentando relictos de fluorita negra (facies pseudo-brechoide).
- Fluorita negra, finamente cristalizada (50 μ m) con numerosos cristales subidiomorfos de dolomita.

En cuanto a la mineralización de plomo, aparece principalmente en forma de galena, encontrándose interestratificada en niveles de potencia centimétrica, discontinuos a lo largo de un nivel principal, o en forma de nódulos o “pintas”, dispersos en las dolomías. Junto con la galena aparece también algo de cerusita o anglesita, de origen secundario.

Junto a la fluorita y la galena, además de calcita y dolomita, se ha puesto de manifiesto la presencia en muy pequeñas cantidades de otros minerales como pirita, calcopirita, esfalerita, barita, cuarzo o minerales de la arcilla. Como minerales supergénicos, se ha identificado la presencia de goethita, malaquita, azurita, hemimorfita, cerusita y anglesita.

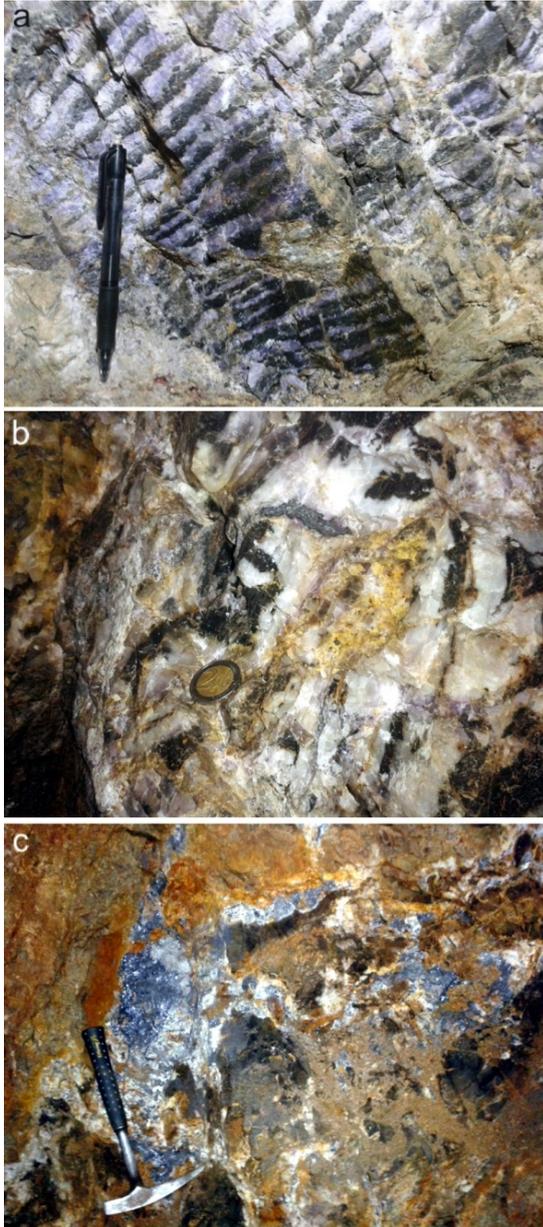


Fig. 6. Algunos tipos de mineralización. a) Fluorita con textura cebrada ("piedra indiana"), con bandas subparalelas a la estratificación. b) Fluorita blanca o violeta cristalizada, muy fracturada y con numerosos relictos de fluorita negra o dolomía. c) Galena interestratificada con fluorita, en un nivel muy brechificado.

El contexto desde el punto de vista sedimentológico corresponde a un dominio de plataforma carbonatada epicontinental de aguas someras, con episodios de inestabilidad tectónica (Fenoll *et al.*, 1987). Los tramos mineralizados tienen un fuerte control estratigráfico y paleogeográfico, de tal forma que las mineralizaciones se concentran preferentemente en facies carbonatadas de aguas someras de tipo *lagoon* y en subambientes relacionados con la formación de islas barrera y llanuras de mareas (*tidal flat*). Con respecto a las dolomitizaciones, tradicionalmente se ha considerado que se producirían por mecanismos de refluo durante la diagénesis temprana, y que la mineralización de estos horizontes

debió producirse de forma coetánea a estos procesos de dolomitización (Martín, 1980). Ovejero *et al.* (1982) establece que se trata de mineralizaciones de tipo diagenético temprano donde se produce alternativamente una dolomitización o una fluoritización sindiagenética y una posterior silicificación. La transformación a facies de tipo franciscana o tipo indiana se produciría durante la diagénesis temprana, junto con procesos de brechificación, apareciendo en algunos puntos una dedolomitización en periodos epigenéticos tardíos. La distribución de las mineralizaciones, incluso a nivel geoquímico, dentro de un tramo litoestratigráfico preciso, y en estrecha relación con las facies dolomíticas y la morfología de las mismas, conduce a considerar la mineralización como sindiagenética. El papel de la actividad volcánica intermedia-básica no resulta claro. En recientes investigaciones (Ilin, 2018; Ilin *et al.*, 2019), mediante el estudio de inclusiones fluidas y espectroscopía Raman, se ha considerado que la formación de la textura franciscana en las dolomías y la mineralización se producen durante una etapa posterior, hidrotermal, que consiste en una dolomitización de la roca de caja, la formación de la textura cebrada durante la diagénesis tardía o inicio de hidrotermalismo, siguiendo el modelo de Merino y Canals (2011), seguido de la mineralización. Los datos obtenidos apuntan a que la formación del depósito posiblemente se habría producido en al menos dos fases. Una fase inicial probablemente de más baja temperatura y moderada-alta salinidad y una segunda fase, aparentemente de temperaturas mayores y con salinidades moderadas. La primera fase podría ser pre-Alpina o bien sin-Alpina, en relación con el inicio de la deformación, mientras que la segunda fase sería de removilización o de rejuvenecimiento post-Alpina durante el Terciario.

Las labores mineras

Las labores son todas subterráneas. Tienen la estructura típica de una minería de montaña donde se realizan varios niveles principales que sirven como galerías de transporte. Estos niveles, que normalmente presentan una diferencia de cota de entre 40 y 60 metros aproximadamente, se encuentran comunicados entre sí mediante chimeneas y rampas. Las chimeneas sirven para verter mineral a niveles inferiores, para paso de personal o para ventilación de las galerías. Por la disposición de los niveles mineralizados y la dirección del eje del pliegue, estos niveles principales de transporte, son en general perpendiculares a la estratificación. Cuando se alcanza uno de los dos niveles principales mineralizados, tanto a techo como a muro, se realiza un crucero que va siguiendo ese nivel, tanto en dirección como en profundidad, de tal manera que se crea una red de galerías más o menos regular (Fig. 7).

La cota 0 de mina se corresponde con la cota 1330 m.s.n.m, llegando las labores hasta la cota -510 (820 m s.n.m.). La diferencia de cotas, junto con la gran cantidad de comunicaciones por galerías y chimeneas entre niveles

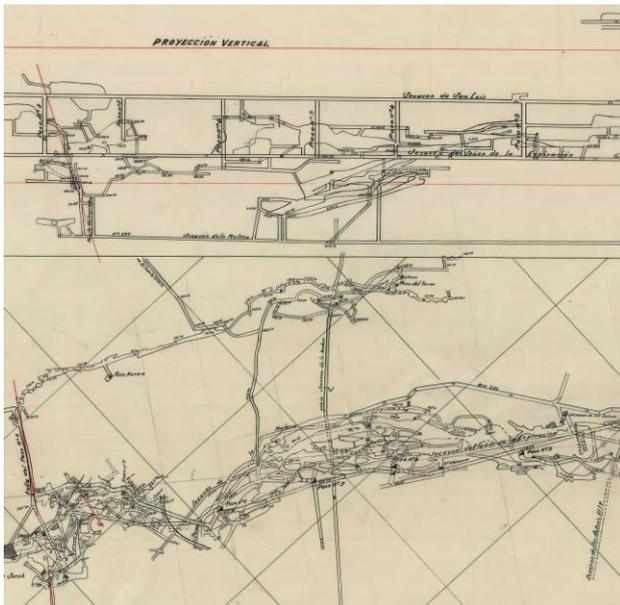


Fig. 7. Ejemplo de planos de labores de los años 80 del s. XX. Planta y esquema vertical del Nivel 140-San Luis. Plano cedido por el Ayuntamiento de Órgiva (Granada).

y bocaminas, constituye un sistema de ventilación natural muy eficaz que proporciona aire fresco a las explotaciones mineras, no siendo necesario, excepto en algunas zonas puntuales, la ventilación forzada. Algunos de las principales galerías son las conocidas como Mina Carriles, El Tajo, San Antonio el IV, San Luis, El Señor, Santa Rita, Las Candelarias o San Isidro. Actualmente se estima que hay unos 140 km de galerías en toda la Sierra de Lújar. La ausencia de agua en las galerías y el tipo de roca existente proporciona un macizo rocoso estable que permite trabajar en buenas condiciones de seguridad.

Proceso de explotación

La Mina Lújar se puede considerar como un yacimiento de filón estrecho en minería subterránea de montaña. Las mineralizaciones están sobre horizontes o zonas preferenciales dentro de los cuales se ensanchan y estrechan, a modo de budines, sin un patrón claramente identificado. Respecto a la inclinación de las capas mineralizadas, presentan buzamientos muy variables, entre 0 y 90°, normal o invertidos, en función de su posición dentro del pliegue anticlinal de la mina, aunque la mayor parte de las explotaciones presentan buzamientos de entre 30° y 70°. Esta inclinación de las capas condiciona el método de explotación. En principio, si es menor de 45°, se explota mediante el método de cámaras y pilares, mientras que si es mayor a 60°, se emplea cámara-almacén, aunque es frecuente una combinación de ambos métodos o una transición entre uno y otro, a medida que va variando el buzamiento de la capa mineralizada. El método de cámaras y pilares (Fig. 8) es un método de apertura de cámaras con pequeño ángulo con respecto a la horizontal que excava huecos y deja pilares distribuidos en función de la riqueza de las mineralizaciones y de las características

geotécnicas de la roca. De acuerdo a unas dimensiones de vanos y pilares determinadas mediante cálculos geotécnicos, se hacen coincidir éstos últimos con zonas pobres en mineralización siempre que sea posible, aunque su posición siempre responde a criterios de seguridad.

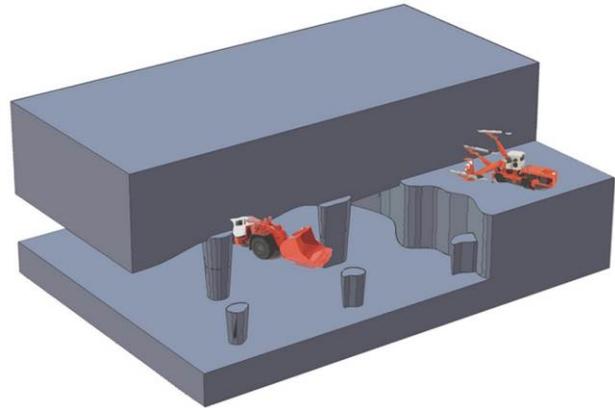


Fig. 8. Sistema de cámaras y pilares.

El método cámara – almacén (Fig. 9) es un método de explotación ascendente en la que la mayor parte del mineral arrancado permanece en la cámara de explotación constituyendo el piso de trabajo para continuar con las labores de extracción mediante perforación y voladura o mediante picado. Además, el material del piso sirve de soporte adicional de los hastiales hasta que se completa la descarga. En este método la preparación de las labores consiste en la preparación de una galería de base (por debajo de la mineralización) que se conecta mediante chimeneas con otra galería de explotación situada por encima de ésta y construida en mineral. Una vez arrancado el mineral se extrae un 30% de las chimeneas mediante palas cargadoras de perfil bajo (L.H.D.), de forma que queda espacio suficiente para seguir trabajando sobre el mineral de la cámara.

Dependiendo de la estabilidad de los hastiales, este método necesita o no de sostenimiento, normalmente bulones y gunita.

Con respecto a las dimensiones de las cámaras, hay que considerar varios factores como son la competencia de la roca encajante y de la propia roca mineralizada en fluorita, que, a su vez, varía en función de factores como la posición estratigráfica o la presencia de fallas y fracturas o de estructuras geológicas como pliegues o zonas de cizalla.

En función de todos estos factores, se diferencian varios tipos de mineralización, que condicionan tanto el método de explotación como su procesado en la planta de tratamiento. Estos niveles y sus características principales se muestran en la Tabla 2.

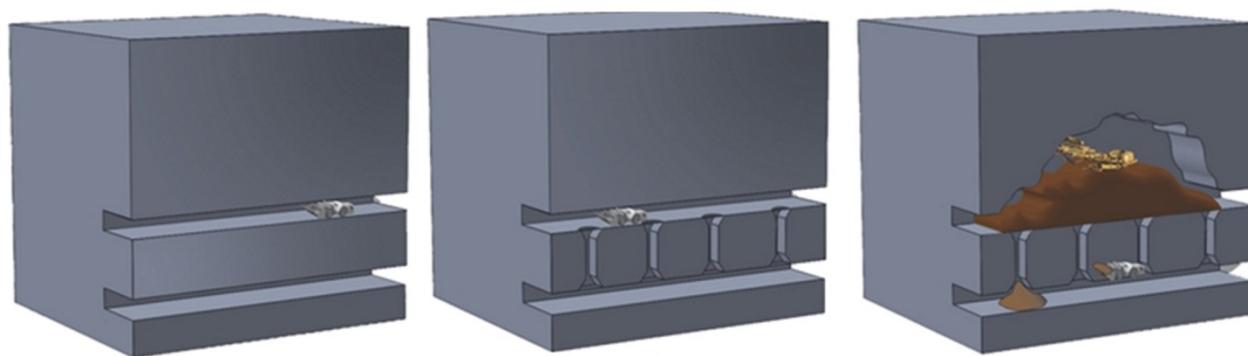


Fig. 9. Ejemplo de cámara almacén.

<i>Zona mineralizada</i>	<i>Características de las explotaciones</i>	<i>Potencias medias</i>	<i>Dimensiones de las cámaras</i>
Supratecho	Techos inestables por contacto con margocalizas. Mineralizaciones ricas en fluorita, presentando la galena contenidos en Pb de hasta 1 Kg/T. Incrustaciones de sílice en fluorita.	0.5-3 metros Fluorita-galena	Altura 2.5 m Vano 3 m
Techo D1 Flanco Norte (Invertido)	Techos estables, pero poco mineralizados.	0-1 metro Fluorita-galena	Altura 1.5 m Vano 2.5 m
Techo D1 Flanco Sur	Techos estables, mineralizaciones normalmente estrechas pero muy continuas. Normalmente fluorita-galena.	0.5-2 metros Fluorita-galena	Altura 3 m Vano 2.5 m
Muro D1 Flanco Norte (Invertido)	Las calizas tableadas de muro aparecen en el techo. Se deja una capa de 0.4 metros de fluorita para que sujeten estas calizas inestables. Mineralizaciones muy importantes, de fluorita principalmente. Históricamente es el nivel más explotado.	1.5-8 metros Fluorita	Altura 6 m Vano 6 m
Muro D1 Flanco Sur	No suele estar mineralizado. Cuando lo está, presenta poca potencia, a excepción de un área que se está investigando en la actualidad, que se asemeja mucho al muro en flanco norte.	0.5-2 metros Fluorita	Altura 3 m Vano 2.5 m
Inframuro	Se conocen pocas áreas mineralizadas en este nivel, pero presentan grandes potencias y alta calidad. Además, la ganga es caliza, que es mucho más fácil de separar por métodos gravimétricos. Presentan grandes potencias (hasta 10 metros).	2-10 metros Fluorita	Altura 6 m Vano 6 m
D2	Mineralizado generalmente a techo, principalmente en plomo, aunque con fluorita ocasionalmente. El muro se ha investigado muy poco.	0.2-1.2 metros Galena - (fluorita)	Altura 3 m Vano 2.5 m

Tabla 2. Tipos de mineralizaciones a considerar para el laboreo y tratamiento. Modificado de Amor y Navarro (2016).

Sistemas de producción

En cuanto a la explotación de mina, el arranque se produce bien mediante perforación y voladura, o bien mediante picado con martillo hidráulico. Los barrenos se realizan con carros de perforación capaces de una producción media de 20 m/h en barrenos de 3 metros y 36 mm de diámetro, con perforadoras tipo MIG (Fig. 10a) o bien mediante perforadora tipo Jumbo (Fig. 10b), con diámetro de 51 mm (2"). El esquema de perforación se realiza mediante barrenos paralelos. La carga se realiza con un cartucho de 26 mm de dinamita en fondo y ANFO en columna, iniciándose mediante detonador eléctrico. Cuando la resistencia a compresión de la roca

lo permite, se realiza el arranque directo mediante martillo hidráulico sobre robot con control remoto (Fig. 10c), siendo más productivo que la perforación y voladura. Además, presenta la ventaja de mantener hastiales saneados durante todo el proceso.

El transporte se realiza mediante pala de perfil bajo (L.H.D.) (Fig. 10d), deszafrando el mineral desde las cámaras de explotación hasta el nivel inferior principal, y de aquí hasta el nivel general de transporte, vertiendo por alguna de las 5 chimeneas principales o bien al exterior de la mina donde el material es llevado a la planta de tratamiento subterránea. La distancia media de acarreo es de aproximadamente 1.5 km, si bien puede llegar a ser de hasta 3 km.



Fig. 10. Ejemplo de máquinas empleadas en la Mina Lijar. a) Perforadora de un brazo. b) Perforadora de dos brazos tipo Jumbo. c) Robot de demolición teledirigido. d) Pala cargadora de perfil bajo (LHD).

El proceso de concentración

Minera de Orgiva, S.L. cuenta con una planta de tratamiento en el interior de una de las galerías principales, la cual concentra el mineral de fluorita desde valores aproximados del 35% hasta un producto final que varía entre el 55 y el 90% de CaF_2 . En función de su enriquecimiento, el mineral será destinado a aplicaciones cementeras o metalúrgicas. Es una de las pocas plantas de tratamiento instaladas en el interior de una mina en Europa.

Inicialmente, el todo-uno llega a la planta a través de palas de carga de perfil bajo (L.H.D.) para interior, las cuales vierten su contenido a través de una rampa hasta la primera machacadora. El material producido en la trituración primaria, a través de una cinta transportadora, pasa a una segunda machacadora, la cual mediante el mismo proceso reduce aún más el tamaño de la roca hasta lograr la granulometría deseada. El material, previamente a la entrada de la segunda machacadora, debe superar una malla que filtra su tamaño. Los restos que no superen esta malla se circulan nuevamente a una machacadora más pequeña pero que realiza la misma función de trituración primaria para obtener un material de granulometría adecuada para la trituración secundaria.

Una vez se ha reducido el tamaño del todo-uno, el material procedente de la segunda machacadora se transporta a una tolva, la cual sirve de entrada al escurridor primario. El escurridor, con forma de una mesa llena de ranuras en su base, permite eliminar mediante limpieza con agua la parte con una granulometría inferior a 1.5 mm. El agua limpia todo el material, arrastrando estas partículas, que se filtran a través de las ranuras de la mesa hasta una tolva de recepción en la parte inferior del escurridor. Este material fino se bombea junto al agua mediante una tubería hasta el concentrador gravimétrico (espirales), donde se recupera la fluorita con esta granulometría. El resto de todo-uno libre de finos sale del escurridor hasta caer a una tolva de mezclado.

La siguiente etapa consiste en la separación dinámica por medios densos. Permite separar sólidos en función de su densidad, usándose como medio un fluido de densidad intermedia. El material procedente del primer escurridor se mezcla en una tolva con la dosis adecuada de agua con ferrosilicio, y esta mezcla se bombea hasta un ciclón en rotación que, mediante fuerzas centrifugas, produce la separación entre la mena, que se desplaza a la parte más exterior del ciclón, y la ganga, que gira más próxima al centro de ciclón. Ambos productos se recogen por separados a la salida del ciclón y pasan a un segundo

escurridor, que sirve para limpiar con agua el ferrosilicio adherido al material de salida, el cual se recupera mediante la utilización de un separador magnético, recirculando nuevamente para comenzar el proceso sin pérdidas de ferrosilicio.

Finalmente, el mineral es transportado hasta una nueva etapa de molienda que proporcionará una granulometría acorde a las necesidades del consumidor y que representa el producto final de la planta. Por otro lado, el estéril se almacena para otros posibles usos.

El material que se genera en el proceso de lavado es procesado mediante un concentrador gravimétrico que consiste en un conjunto de espirales con canaletas helicoidales con cuatro a nueve vueltas. Las partículas más pesadas se reúnen en el fondo, donde la fricción y el lastre actúan para aminorar la velocidad del material. Debido a la forma de espiral del lecho de la canaleta, las fuerzas centrífugas en la pulpa llevan al material más liviano hacia afuera, hacia el borde de la espiral, mientras que el material pesado permanece adentro. Este sistema permite de forma óptima la separación de la fluorita (densidad: 3.18 kg/m^3), la galena (7.60 kg/m^3) y el estéril, constituido principalmente por caliza (2.70 kg/m^3) y dolomía (2.85 kg/m^3).

Actualmente está en desarrollo una planta piloto de flotación mediante columnas con el fin de beneficiar el material que actualmente no es recuperable por las espirales (lamas con tamaño de grano inferior a $150 \mu\text{m}$). La flotación de minerales es un método utilizado para separar y concentrar minerales basado en la diferencia de las propiedades superficiales de las distintas especies minerales. La hidrofobicidad e hidrofiliicidad de los distintos minerales son generalmente inducidas mediante la introducción al proceso de una serie de reactivos químicos. Esta técnica, de gran complejidad, se basa en una combinación de las leyes de la química superficial, química coloidal, mineralogía y física.

En la Fig. 11 se muestra la planta de medios densos (a), la planta de espirales (b) y la planta piloto de flotación (c).

Características medioambientales

Uno de los grandes desafíos a los que se enfrenta una explotación minera es a una adecuada gestión medioambiental de los residuos y de factores como ruidos, polvo, etc., tanto por el coste económico, como por la degradación medioambiental que puede suponer. Estos desafíos también son económicos o tecnológicos, e incluyen reducir los altos costes de inversión, reducir la generación de residuos y grandes relaves, identificar y abordar los impactos ambientales, y mejorar la flexibilidad, la automatización y la seguridad de las operaciones. Además, en general, la desconfianza pública hacia el sector de las materias primas se basa, a veces, en un mal legado de la minería, tanto en forma de residuos

como de accidentes. Esta idea a menudo también se alimenta de prejuicios y falta de conciencia de la importancia de las materias primas para la sociedad. Esto además, se incrementa en determinadas áreas especialmente sensibles, como es la Sierra de Lújar, muy cercana al Parque Nacional de Sierra Nevada, y

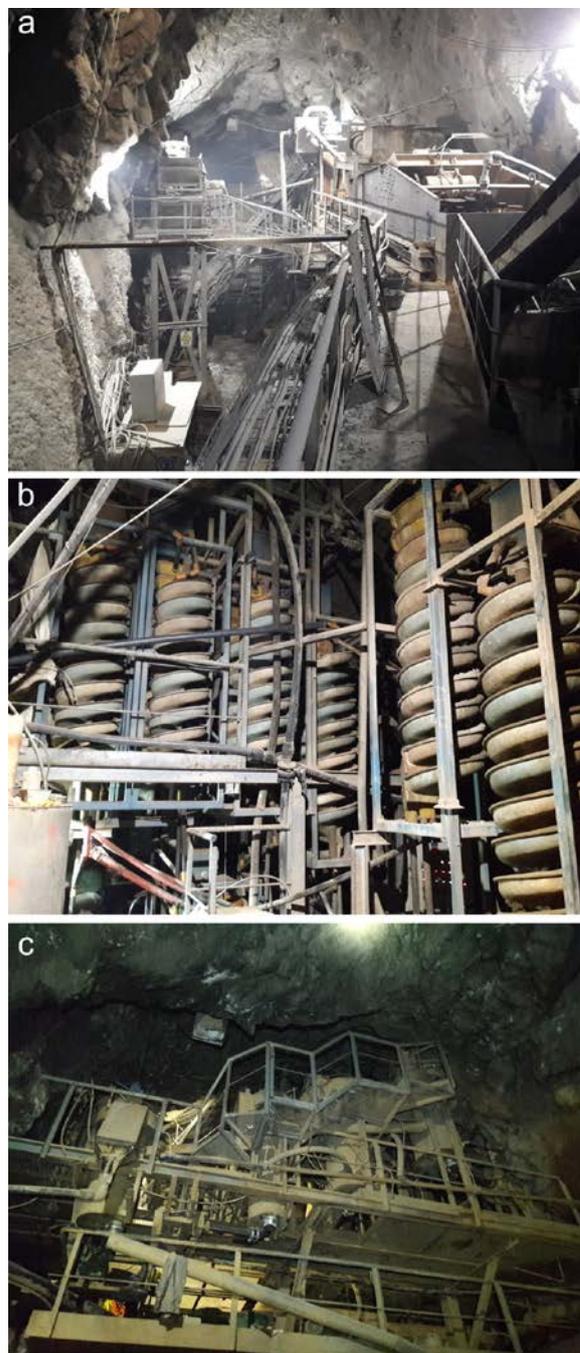


Fig. 11. Instalaciones de tratamiento. a) Planta de medios densos. b) Planta de espirales. c) Columnas de flotación.

englobada en una comarca, Las Alpujarras, que tiene al turismo como una de sus principales fuentes de ingreso.

Para superar estos conflictos de intereses contradictorios, los conceptos de minería invisible, minería de impacto cero y minería verde son cada vez más necesarios para las actividades mineras en muchas áreas de Europa y, en general, a nivel mundial. A pesar

de que el sector minero actualmente es visto como anticuado y altamente hostil para el medio ambiente, es importante aunar esfuerzos para revertir esta imagen, al mostrar que la extracción y el procesamiento de minerales se pueden realizar de una manera más innovadora y sostenible. Es por eso que será cada vez más importante desarrollar e implementar nuevas soluciones económicamente viables para explotar este tipo de recursos y obtener materiales de interés con un mínimo de residuos y emisiones, así como un consumo mínimo de energía y agua.

En el presente caso, Minera de Órgiva S.L. realiza una gestión integral de los residuos, de tal forma que la afección medioambiental es mínima. Los problemas principales son los derivados de la planta de tratamiento y de la gestión de los estériles. La planta de tratamiento está instalada en el interior de una galería, con lo que se reducen hasta el mínimo problemas derivados de la formación de polvo o ruidos, siendo inapreciables en el exterior. La instalación eléctrica se realiza mediante grupo electrógeno, evitando así la existencia de cables en el exterior, reduciendo por tanto, el riesgo de incendio. Estos grupos electrógenos van alimentados con gasoil, generando humos como consecuencia de la combustión. Para evitar su salida al exterior, estos humos se reconducen para alimentar el tambor de secado (*trommel*) de material, de tal manera que se aprovecha el calor generado para el secado de la fluorita, reduciendo por tanto el consumo energético y evitando la emisión de los gases de combustión. Otra cuestión destacada es el bajo consumo de agua en el beneficio del material. El consumo actual es inferior a 1 l/s, reciclando además más de un 80% del agua consumida. La instalación de la planta en interior permite reconducir y aprovechar casi toda el agua que se consume, mediante un sistema de aljibes y balsas, aprovechando, además, toda el agua de escorrentía de la precipitación que cae por los alrededores de la mina. Respecto a los estériles de mina o el generado tras todo el proceso de tratamiento y concentrado del mineral en planta, se emplean para rellenar cámaras antiguas, cuya explotación se ha dado por concluida, con el fin de incrementar las condiciones de seguridad y estabilidad de la zona. Estos estériles son residuos totalmente inertes, puesto que el proceso de concentración actualmente se realiza por medios exclusivamente mecánicos y físicos. De esta forma no se generan nuevas escombreras que puedan suponer una degradación medioambiental.

Estas buenas prácticas medioambientales han conducido a que la “Mina Lújar”, sea incluida como ejemplo de “exploración efectiva y diseño del emplazamiento” por la Unión Europea en la guía “*Desarrollo de un documento de orientación sobre las mejores prácticas en los Planes de Gestión de Residuos Extractivos (EWMP)*”, editada recientemente (European Commission, 2019).

LA FLUORITA Y LA ESTRATEGIA DE “CRITICAL RAW MATERIALS”

En Europa, la mayoría de los depósitos minerales de fácil acceso están prácticamente agotados. Por ello, la Unión Europea es consciente de que las oportunidades principales para acceder a las materias primas dentro de su territorio se ubican en lugares técnicamente difíciles por estar a grandes profundidades, en áreas remotas, en áreas pobladas, en antiguas minas, en depósitos de baja ley o en pequeños depósitos donde las operaciones mineras más grandes no son técnicamente factibles o económicamente viables. La viabilidad económica de estos depósitos depende de los precios del mercado y también de la eficiencia de la operación, desde la perforación hasta el producto final. El pequeño tamaño de las operaciones que se desarrollan para extraer estos depósitos impide campañas de exploración intensivas para definir los límites y la calidad del cuerpo del mineral, por lo que es necesario encontrar tecnologías avanzadas para guiar las etapas posteriores de la extracción.

En este contexto, la minería de depósitos pequeños, en particular, es especialmente interesante, ya que existe una necesidad específica de desarrollar soluciones rentables y ambientalmente avanzadas, puesto que antes de invertir en un pequeño depósito minero, se deben tener en cuenta los posibles beneficios y el retorno de la inversión. Para lograr este objetivo, es esencial mejorar la capacidad de tratamiento, con procesos equivalentes a los utilizados en minas más grandes y basados en tecnologías de minería flexibles. Esto, obviamente, incluirá el desarrollo de tecnologías mineras altamente automatizadas y rentables para mejorar la eficiencia económica de las pequeñas explotaciones.

Por otro lado, las leyes más bajas y los minerales complejos también presentan dificultades económicas y técnicas relevantes, lo que hace que muchas minas como la Mina Lújar muestren importantes limitaciones:

- El depósito es complejo, pequeño o profundo y presenta altos costes de excavación y operación. Como se ha descrito anteriormente, el caso de la Mina Lújar presenta estas características, ya que la potencia de las capas raramente supera los 3 metros, y por lo tanto está bastante limitado en extensión, restringiéndose exclusivamente a determinadas zonas de la Sierra de Lújar. En cuanto a la profundidad, se encuentra desde cotas casi superficiales hasta cotas de al menos 510 metros bajo la superficie, lo que supone un fuerte incremento de los costes de explotación o de transporte.
- La mena contiene minerales intersticiales y microcristalinos que requieren un tamaño de liberación muy fino. Como resultado, la trituración y la molienda son muy intensivas, requieren mucha

energía y son extremadamente costosas. En el caso de la fluorita, la presencia abundante de lamas, es decir, fragmentos de tamaño de grano inferior a 150 µm, dificulta en gran medida el procesamiento mediante espirales o flotación, impidiendo una recuperación óptima de todo el mineral.

- La separación de las diferentes fases minerales que contienen los elementos de interés es difícil, lo que dificulta la obtención de concentrados comerciales, así como altas tasas de recuperación, perdiendo una proporción sustancial del producto objetivo al no disponer de una tecnología óptima de recuperación. En este caso, la fluorita viene frecuentemente ligada a calizas o dolomías, pudiendo haber fragmentos que contengan ambos minerales, a cualquier tamaño de grano. Es lo que se conoce como “mixtos”, los cuales no responden de forma adecuada al proceso de separación por medio denso o espirales, lo que supone un incremento del coste al tener que reducir el tamaño de grano mediante molienda, para aprovechar aún más el mineral.
- La viabilidad de las minas está estrechamente relacionada con los precios de los minerales y de los metales, así como con las condiciones del mercado, de modo que su viabilidad puede alcanzar una situación crítica cuando los precios descienden de los costes de producción.

En esta dirección, se está desarrollando actualmente (2016-2020) un proyecto del programa Horizonte 2020 denominado SLIM (*Sustainable Low Impact Mining solution for exploitation of small mineral deposits based on advanced rock blasting and environmental technologies* - <https://www.slim-project.eu>), cuyo objetivo es desarrollar soluciones basadas en la fragmentación no lineal de la masa de roca mediante la optimización de modelos de voladura, control de partículas suspendidas en el aire, efectos de la vibración y acciones de mitigación de la lixiviación de los nitratos procedentes del explosivo para la explotación de pequeños depósitos minerales. El desarrollo de este proyecto tendrá como consecuencia una explotación más rentable y sostenible de los recursos minerales, acorde con las políticas más recientes en esta dirección de la Unión Europea. Asimismo, permitirá una reducción del impacto ambiental y una mejor aceptación social, al disminuir los costes de explotación y tratamiento al optimizar la fragmentación de la roca en la fase de voladura, generando, por tanto, menos estériles, y reduciendo una parte de los efectos derivados de las mismas, como el polvo, los gases o las vibraciones.

Es por todo ello, que depósitos minerales como los que se localizan en las Sierras de Lújar o Gádor son ideales para la estrategia de recursos minerales que pretende seguir a la Unión Europea en un futuro cercano. Como se muestra en la Tabla 1, la alta dependencia exterior de la fluorita, su elevado índice de sustitución y su bajo índice de reciclado, hace que sea prioritario el desarrollo de este tipo de explotaciones.

CONSIDERACIONES FINALES

La fluorita (o espato-flúor en su nombre comercial) es una de las 27 materias primas críticas cuya disponibilidad para la Unión Europea corre riesgo por su escasez de suministro y porque tiene la potencialidad de tener un importante impacto en la economía.

Mínera de Órgiva, S.L. retomó en el año 2010 la explotación de un yacimiento milenario de fluorita y plomo, con el fin de realizar una explotación racional del recurso. En conjunto, esta actividad minera ha supuesto un gran impulso económico, particularmente para Órgiva y las localidades cercanas, y en general, para la provincia de Granada, con un bajo coste ambiental, puesto que la mayor parte de la actividad minera (explotación y tratamiento) se realiza en interior, con lo que la afección ambiental es casi nula.

La Mina Lújar cumple con las características indicadas por la Unión Europea respecto a la evolución que debe tomar la minería en Europa para reducir la dependencia exterior de materias primas, a pesar de ser un yacimiento de pequeño tamaño, gran complejidad y con baja ley.

Respecto a las perspectivas de futuro, son varios los objetivos que se pretenden lograr, todo ello en relación con sustancias consideradas CRM:

- El estudio de nuevas zonas donde desarrollar la actividad minera, teniendo en cuenta la necesidad de CRM, tales como la previsión del reinicio de las explotaciones de fluorita en la Sierra de Gádor (Almería) o de barita en la zona de la Carolina (Jaén). Esto permitirá garantizar el suministro de materias primas durante un largo periodo de tiempo, permitiendo además un incremento de la producción en el caso de la fluorita.
- A nivel minero, se pretende mejorar la maquinaria para reducir los costes de producción y de mantenimiento, así como el impacto medioambiental de los equipos, para lo que actualmente se están desarrollando proyectos con varias universidades y empresas privadas de maquinaria, con el fin de automatizar procesos.
- A nivel de tratamiento de mineral, se pretende mejorar el rendimiento en la obtención de fluorita metalúrgica, lograr fluorita en grado ácido mediante la planta de flotación y conseguir producciones mayores que permitan reducir los costes de planta y bajar la ley de corte.
- A nivel medioambiental, seguir la línea de instalaciones en interior mina y dar a conocer nuestro sistema de procesamiento y minería de interior, que permita abrir camino ante las distintas administraciones para plantear otros posibles proyectos mineros.
- A nivel económico, nuestro punto de vista se torna algo más clásico por apostar por una minería a largo

plazo, aunque suponga pequeños-medios beneficios en una vida de proyecto lo más larga posible y mayor aprovechamiento de los recursos en oposición a la tendencia de realizar una minería con el mayor beneficio en el menor tiempo posible.

Ante el agotamiento de los grandes depósitos de recursos minerales en Europa, o ante la mayor dificultad en su explotación debido a condicionantes medioambientales y sociales, la política de la Unión Europea de fomentar la minería de pequeños depósitos antiguamente denostados por su baja rentabilidad o mayor complejidad técnica, favorece enormemente el desarrollo de la economía local. Se trata, en general, de explotaciones pequeñas, explotadas por compañías locales o regionales, con trabajadores y proveedores en su mayor parte de la comarca. Además, estas explotaciones pueden ser totalmente compatibles con la conservación de las características ambientales del territorio, sin que su desarrollo suponga un riesgo para los valores ambientales de una zona.

La apertura de nuevos proyectos de similares características puede suponer un impulso a la economía de las zonas afectadas, y en general a la región, sin que ello suponga un incremento de la degradación medioambiental, como ha quedado demostrado en el presente caso.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Proyecto SLIM del programa Horizonte 2020 de la Unión Europea (nº 730294) (<https://www.slim-project.eu/>).

Los autores desean expresar su agradecimiento a dos revisores anónimos por su contribución a la mejora de este artículo.

REFERENCIAS

Amor, C. & Navarro, R. (2016): Minería del flúor en la Sierra de Lújar. *Rocas y Minerales*, **536**, 46-58.

Callahan, W.H. (1967): Some spatial and temporal aspects of the localization of Mississippi Valley-Appalachian type ore deposits. in: "Genesis of stratiform lead-zinc-barite-fluorite deposits (Mississippi Valley Type Deposits). A symposium.", J.S. Brown, ed., Economic Geology Monograph 3, Society of Economic Geologists Inc., Economic Geology Publishing Inc, New York, USA, 14-19. ISBN: 978-1-629495-50-7.

Cohen, A. (2002): Minas y mineros de Granada (Siglos XIX y XX). Diputación de Granada, Granada, España, 161 p. ISBN: 9788478073290.

Costa, J. (1895): Estudios Ibéricos. Tipografía de San Francisco de Sales, Madrid, España, 207 p.

ENADIMSA (1986): La minería andaluza. Libro Blanco Vol 1. Dirección General de Industria, Energía y

Minas. Consejería de Economía y Fomento, Sevilla, España. 350 p.

European Commission (2011): Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Tackling the challenges in commodity markets and on raw materials. COM/2011/0025 final. European Commission, Brussels, Belgium, 23 p. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0025:FIN:en:PDF>. [consulta: 12 abril 2019].

— (2014a): Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on the review of the list of critical raw materials for the EU and the implementation of the Raw Materials Initiative. COM/2014/0297 final. European Commission, Brussels, Belgium, 7p. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:52014DC0297> [consulta: 12 abril 2019].

— (2014b): Horizon 2020 en breve. Programa Marco de Investigación e Innovación de la Unión Europea (Horizonte 2020). European Commission, Luxembourg, 40 p. ISBN: 978-92-79-38915-3. DOI: 10.2777/80075 [consulta: 12 abril de 2019].

— (2017a): Study on the review of the list of Critical Raw Materials. European Commission, Luxembourg, 93 p. ISBN: 978-92-79-47937-3. Catalogue number: ET-04-15-305-EN-N. <https://dx.doi.org/10.2873/876644> [consulta: 12 abril de 2019].

— (2017b): Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on the 2017 list of Critical Raw Materials for the EU. COM/2017/0490 final. European Commission, Brussels, Belgium, 8 p. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2017:0490:FIN> [consulta: 12 abril de 2019].

— (2019): Development of a guidance document on best practices in the extractive waste management plans. Circular economy action. European Commission, Luxembourg, 46 p. ISBN: 978-92-76-00037-2. Catalogue number: KH-03-19-104-EN-N. <https://dx.doi.org/10.2779/061825> [consulta: 12 abril de 2019].

Ewert, K. (1976): Estratigrafía, litología y mineralizaciones del Manto de Lujar (Zona Bética). *Studia Geológica*, **11**, 109-120.

Fenoll-Hach-Ali, P., Delgado-Salazar, F., Fontboté-Rubio, L., Gervilla-Linares, F., Martín-Martín, J.M., Rodríguez-Gordillo, J., Torres-Ruiz, J., Velilla-Sánchez, N. (1987): Los yacimientos de fluorita, plomo, cinc y bario del sector central de la Cordillera Bética. Departamento de Mineralogía-Petrología, Universidad de Granada, Granada, España. 127 p.

Fontboté, L. & Gorzawski, H. (1988): Isotope (Sr, C, O, and S) tracing of diagenetic ore formation in carbonate-hosted ore deposits illustrated on the F-(Pb-

- Zn) deposits in the Alpujarrides, Spain and the San Vicente Zn-Pb mine, Perú. in “Mineral deposits within the European Community”, J. Boissonnas & P. Omenetto, eds. Special Publication No. 6 of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits, vol 6. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany, 465-484. https://doi.org/10.1007/978-3-642-51858-4_25
- Ilin, A. (2018): Mineralogía y microtermometría de los diferentes tipos de depósito de fluorita de “Mina Lújar” (Órgiva, Granada). Trabajo de Fin de Máster, Universidad de Granada. 47 p.
- , Velasco, F., Navarro, R., Tornos, F. (2019): New data on Alpine type fluorite deposits: case of Lújar mine in Betic Cordillera (SE Spain). *Macla*, **24**, 00-00.
- Madoz, P. (1850): Diccionario geográfico-estadístico-histórico de España y sus posesiones de ultramar. Establecimiento tipográfico de P. Madoz y L. Sagasti, Madrid, España. 1130 p.
- Martin, J.M. (1980): Las dolomías de las Cordilleras Béticas. Tesis Doctoral, Universidad de Granada. 201 p.
- , Torres-Ruiz, J., Fontboté, L. (1987): Facies control of strata-bound ore deposits in carbonate rocks: the F-(Pb-Zn) deposits in the Alpine Triassic of the Alpujarrides, southern Spain. *Mineral. Deposita*, **22**, 216-226. <https://doi.org/10.1007/BF00206613>
- , —, Velilla-Sanchez, N., Fenoll-Hach-Ali, P. (1984): Paleokarstic Lead-(Zinc)-Fluorite deposits in shallowing upward sequences in the Triassic of the Alpujarrides (Betic Cordillera, Southern Spain). in: “Syngensis and Epigenesis in the Formation of Mineral Deposits”, A. Wauschkuhn, C. Kluth, R.A. Zimmermann, eds. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 438-447. https://doi.org/10.1007/978-3-642-70074-3_40
- Merino, E. & Canals, A. (2011): Self-accelerating dolomite-for-calcite replacement: self-organized dynamics of burial dolomitization and associated mineralization. *Am. J. Sci.*, **311**, 573–607. <http://dx.doi.org/10.2475/07.2011.01>
- Ovejero, G., Tona, F., Marín, J.M., Gutiérrez, A., Jacquín, J.P., Servajean, G., Zubiaur, J.F. (1982): Las mineralizaciones estratiformes F₂Ca-Pb en las dolomías triásicas de sierra de Lujar (Cordilleras Béticas, España). *Bol. Geol. Min.*, **93** (6), 15-35.
- Pérez-Salguero, A.J. (2017): Los candiles cerámicos como indicadores de la minería medieval Andalusí en Sierra de Lújar (Granada). *Espacio, Tiempo y Forma*, **10**, 249-295. <http://dx.doi.org/10.5944/etfi.10.2017.17915>.
- Regueiro, M. (2014): Minerales críticos en Europa: metodología para la evaluación de la criticidad de los minerales. *Macla*, **19**, 1-9.
- Reolid, A. (2017): Avances en la investigación de los depósitos F-Pb-(Zn) de las Cordilleras Béticas: The state of the art. Trabajo de Fin de Máster, Universidad de Granada. 47 p.
- Roldan, F.J. (2011): La Andalucía Alpina. in: “Cartografía de Recursos Minerales de Andalucía”, A. García-Cortes, ed. ppal. IGME-Consejería de Economía, Innovación y Ciencia de la Junta de Andalucía, Madrid, 32-59. ISBN: 978-84-7840-869-6 y 978-84-7595-276-5.
- Sangster, D.F. (1990): Mississippi Valley-type and sedex lead-zinc deposits: a comparative examination. *Trans. Inst. Min. Metall., Sect. B*, **99**, B21-B42.
- Sanz de Galdeano, C. & López-Garrido, A.C. (2014): Structure of the Sierra de Lujar (Alpujarride Complex, Betic Cordillera). *Est. Geol.*, **70** (1), e005. <http://dx.doi.org/10.3989/egeol.41491.290>
- Trio, M. & Guillermo, M. (2017): Panorama minero. IGME. Madrid. 719 p. NIPO: 064170148.
- Tritlla, J., Levresse, G., Corona-Esquivel, R., Banks, D., Lamadrid, H., Bourdet, J. (2006): Depósitos de Pb-Zn-Cu-Ba-F-Sr epigenéticos estratoligados en series sedimentarias en relación con salmueras de cuenca: depósitos de tipo “Mississippi Valley” (MVT) y similares en México. *Bol. Soc. Geol. Mex.*, **58**, 103-139. <http://dx.doi.org/10.18268/bsgm2006v58n1a4>

Geology and mining at the Panasqueira W-Sn deposit

Paulo Ferraz (1*), Filipe Pinto (1)

(1) Beralit Tin and Wolfram, (Portugal) S.A., Barroca Grande, 6225-051, Aldeia de S. Francisco de Assis, Castelo Branco (Portugal)

* corresponding author: paulojvferraz@gmail.com

Abstract:

The importance of exploration geology in an active mine must always be highlighted. Exploration geology will invariably be a strong part of the present and especially of the future of mines. The Panasqueira mines are a good example of how a very small technical team can deal with a heritage of more than a century. The professional and personal relationship amongst all the technical people is probably one of the keys to the success. The Panasqueira mines have a good, daily coexistence between conventional and non-conventional geology mine working, from the exploration to the evaluation of the resources/reserves, finalizing in grade control. The exploration geology work in the Panasqueira mines does not finish with just the core drill holes and is mixed with mining engineering that has to systematically open exploration adits named “inclines”, still in an exploration phase. Panasqueira is one of the few mines worldwide which has been working for more than 130 years, producing the best wolframite concentrate in the world, as well as cassiterite and chalcopyrite concentrates, and furthermore crystal specimens of several minerals much appreciated all around the world.

Resumen:

La importancia de la exploración geológica en una mina activa siempre debe ser siempre destacada. La geología de exploración será invariablemente una parte importante del presente y especialmente del futuro de las minas. Las minas de Panasqueira son un buen ejemplo de cómo un equipo técnico muy reducido puede gestionar una herencia de más de un siglo. La relación profesional y personal entre todos los técnicos es probablemente una de las claves del éxito. Las Minas de Panasqueira tienen una buena coexistencia diaria entre el trabajo de geología en mina, convencional y no convencional, desde la exploración hasta la evaluación de recursos/reservas y el control de leyes. Los trabajos de exploración en las Minas de Panasqueira no finalizan con los sondeos, sino que van en paralelo con la ingeniería de minas, que tiene que abrir de una forma sistemática galerías -llamadas “inclines”-, aún incluso en la fase de prospección. Panasqueira es una de las pocas minas en el mundo que ha estado trabajando desde hace más de 130 años, produciendo el mejor concentrado de wolframita del mundo, así como concentrados de casiterita y calcopirita, además de muestras de cristales de diversos minerales, muy apreciados en todo el mundo.

Palabras Clave: Exploración, Minas de Panasqueira, Wolframita. **Key Words:** Exploration, Panasqueira Mines, Wolframite.

INTRODUCTION

The Panasqueira mines are located in the Covilhã Municipality in the Centre of Portugal, in the south of the Serra da Estrela Mountain (the highest point of Continental Portugal) (Fig.1). The topography is mountainous with difficult accessibility; the drive by car to the mine is around 30-40 km on a twisty road.

The name of the Panasqueira mine refers not only to one isolated mine but to a cluster of small ancient mines, located in the same region, which have changed their location depending on the mining activity. There are recordings of the exploration work, both underground and at the surface, continuously and

diversified throughout all the exploitation of the Panasqueira mines.

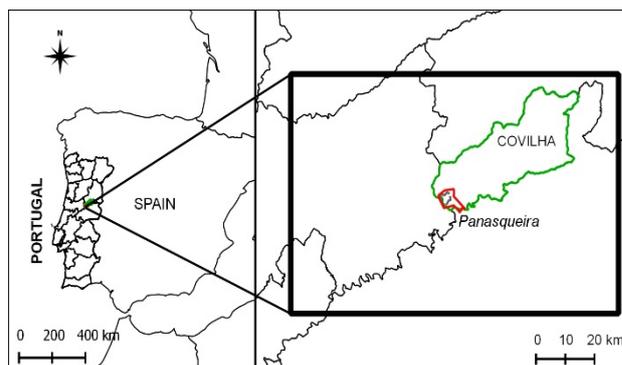


Fig 1. Location of the Panasqueira mines.

The first references to the Panasqueira mines are from 15 September 1881 when Manuel dos Santos went to the Covilhã Town Hall to register the mining activity rights of the Vale de Ermida zone.

During the history of the Panasqueira mines there have been several different owners, usually British or South Africans, with the Japanese company Sojitz being the exception.

GEOLOGY

The Panasqueira deposit is located in the Central Iberian Zone (CIZ) in a monotonous series of schists named “Xistos das Beiras” that cover a big area of the Centre of Portugal. These schists are part of a complex geological unit known as the Schist Greywacke Complex.

In the surrounding area of the mines, the influence of a magmatic intrusion found at depth, which generated a metamorphic contact aureole, can be noted (Kelly, 1977; Kelly and Rye, 1979). This aureole is expressed by spotted schist, observed on the surface and in underground excavations. It is also possible to see acid and basic magmatism manifestations, represented by aplite and pegmatite veins and dolerite dykes, respectively (Thadeu, 1951; Reis, 1971).

In the underground excavations, the magmatic intrusion is expressed by a greisen cupola found at elevations of 620m, 560m and 530m, located in the northern part of the mine. Thadeu (1951) was the first author who described this. The deposit is limited to the north by a regional E-W shear fault called the “Cebola”. No exploitation work is known to the north of it; therefore, the mineralization is considered confined by this structure.

The Panasqueira ore is constituted by a dense swarm of horizontal quartz veins with several different minerals, some of them in economic concentrations, allowing their underground exploitation.

The following mineral paragenetic sequence (Table 1), globally accepted (Kelly and Rye, 1979), shows the most frequent minerals in the Panasqueira veins.

	Oxides + Silicates	Sulphides	Pyrrhotite Alteration	Later Carbonates
Quartz	I, II			IV, V
Muscovite	I	III		
Tourmaline				
Topaz	I, II	III		
Arsenopyrite				
Cassiterite				
Wolframite				
Pyrite		I	II	III, IV, V, VI
Pyrrhotite				
Sphalerite		I	II	III, IV
Chalcopyrite				
Stannite		I	II	
Galena				
Apatite				
Marcassite			I	II
Magnetite				
Hematite				
Siderite				
Fluorite				
Chlorite				I, II
Dolomite				
Calcite				

Table 1. Paragenetic mineral assemblage from Kelly and Rye (1979). Roman numbers represent different stages of the same mineral.

The economic minerals exploited in the Panasqueira mines are wolframite (*var.* ferberite), cassiterite and chalcopryrite. Other useful minerals, such as sphalerite, siderite and topaz, are present but unfortunately are not economic even as a by product due to the difficulties to extract them at the concentration/separation plant. Even when separated, the small quantities produced place them below any industrial economic interest.

The Panasqueira sub-horizontal veins are commonly 18-30 centimetres thick, but can reach up to 100 centimetres, which is why the stopes are only about 2.2 meters high. As all the mineralization is limited to the veins, any other material taken out would represent dilution. The morphology of the veins is not always continuous and/or homogeneous.

It is very common to see veins ending in an “eel tail”. Frequently, a vein that closes in an “eel tail” will begin some centimetres or metres ahead and/or above or below another “eel tail” (Fig. 2). In reality this geometry is apparent and frequently the termination is only a 2D apparent effect and the tails are part of the same vein.



Fig 2. Example of a mineralized vein ending as an “eel tail”. (Source: photography from the authors).

HISTORIC EVOLUTION OF THE MINES

The exploitation work is dispersed along a hill. The first mining work began over the quartz veins outcropping at elevations around of 1,000 metres, from the top of the hill to elevations of around 500 metres, at the bottom of the hill side (Vaz Leal, 1945).

The work followed those veins and the mine has been growing up until the present day. Nowadays, the main structure is located near the Barroca Grande locality. This small village is located on the south side of Panasqueira (the village where all the mining work began) and to the east of the Vale de Ermida village.

For several years, the mines have been growing to lower elevations, exploring deeper veins. Before 1946, the mine exploited veins up to the elevation of 740 metres (above level 0), from 1946 to 1978 up to the 620 metre elevation (levels 0 and 1), from 1978 to 1989 up to the 560 metre

elevation (level 2) and from 1989 to 2005 up to the 470 metre elevation (level 3).

From 2005 up to the present day the mines have begun to exploit in the opposite way, that is, from 2006 to 2008 the mine returned to exploiting previously worked levels, returning from level 3 to level 2, in 2009 the exploitation returned to level 1 and in 2013 level 0. Therefore, from 2014 till the present, the veins mined are from all the levels (level 0 to level 3).

The mining activity is returning to the old and still not mined veins or at least to the borders of the old mined ones. This means that the ore that is being mined usually has lower grades than the historical ones. As the work returned to previously mined zones, the access to information obtained in those years has become a powerful ally of the exploration geologist.

The historic stope data constitute a very important part of the mining exploration at Panasqueira. This is essential not only to know where the veins have been previously mined but also how it was done and what have been found as wolframite grades in the borders of those old exploitations. This research also allows us to get information about some characteristics of the stopes, such as vein inclination, thickness, expected grades, and, in some cases the lithology and structural mapping (eg. presence of faults).

Figure 3 shows an example of an old section drawn by hand, where it is possible to see the information present in these old documents (the galleries have 2,2m height).

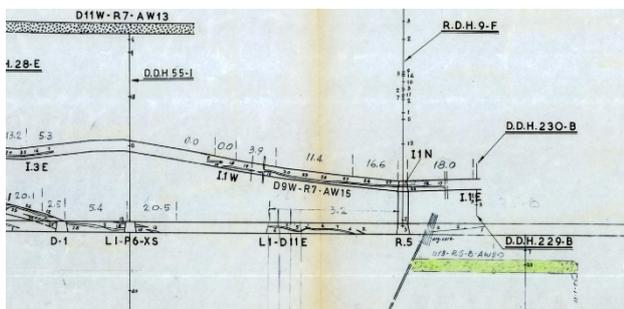


Fig 3. Old section image from Drive D11. (Source: Beralt Tin and Wolfram Portugal).

Furthermore, a survey from the historic drill holes done in the Panasqueira mines shows thousands of old drill holes that in 2004 were still only available in paper reports. In the last 15 years, the technical staff of the mine has created and updated a global digital database with all this historical information. All the sections were included and updated using specialized software.

The information about previously mined zones is also very useful regarding the safety issues. The risks of being very close to an old stope must be minimized in order to prevent accidents that could be very serious. If there is not enough thickness of rock between stopes, the roof could fall causing injuries or damaging equipment, for

example, a machine falling some metres to a stope located below.

For several years only some statistic data from 1946 to the present was recorded; the research work has allowed us to recover 12 years of history and get data from 1934 onwards. Before that, there were no known records about the exploitation or exploration done...anyway it is 85 years of history recovered.

STRUCTURE OF THE PANASQUEIRA MINES

During many years the mines did not have a well-defined plan, with the size and direction of the galleries being defined by the geometry of the veins that were being exploited. This is visible in the old parts of the mine where their distribution takes more random forms (Fig. 4).

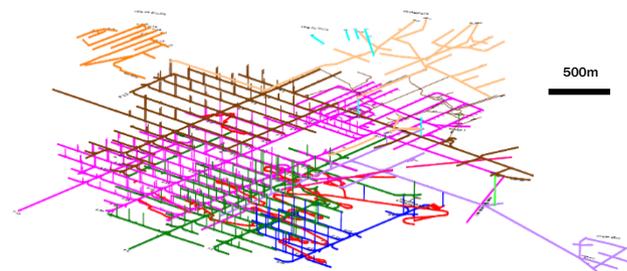


Fig 4. Global structure of the Panasqueira Mines. Note that different colours represent different mine levels. (Source: Beralt Tin and Wolfram Portugal).

The concession area had several different and separated zones and entrances, but their exploitation zones connected with each other in underground (Vale de Ermida-Panasqueira-Corga Seca). The old exploitations were done with the “Long wall” method. The veins were exploited following the ore along a gallery and, while it was depleted on one side of the adit, the produced waste and wood were used to make the wall in the exploited zone on the other side of the adit.

Since at least 1960, the mines have been developed further to the south of the original galleries and their geometry became regular with the definition of “drives” (D) (E-W galleries) separated by 100 metres and “panels” (P) (N-S galleries) 50 metres apart. All the mine structure follows an azimuth of N30°.

As stated above, the “old mine” is located at the north side and until 2015 the new mine was developed essentially to the south. The mine is now growing back towards the north, below the “old mine” level, that stopped near the base of level 1 (620m). Figure 4 presents a general picture of the mine works where the different exploited zones are represented, from Vale de Ermida (900m) to Fonte do Masso (614m), Rebordões (650m) Salgueira (530m) and Corga Seca (520m).

The current exploitation is dispersed over a huge area, once there are stopes in the north, south, east and west sides of the mine, as well as mining from level 3 (470m elevation) to level 0 (above 680m elevation). From a base level to another base level, ramps are planned and executed in order to intersect the maximum of veins possible, previously defined by drill holes. When those veins are intersected, “inclines” are opened up, these are galleries opened following the vein in a typical mesh of 100mx50m.

These galleries (“inclines”) expose the veins allowing the geology team to measure the grade, *in situ*. The WO₃ grade measured is decisive whether to make or not a stope there. If the measured grades show a good possibility of producing an economic exploitation, a gallery is opened (5 metres wide) defining an almost square mesh with 11mx11m pillars until the vein disappears or turns out to be systematically uneconomic, usually below 18 cm.

When all the vein has been covered by the 11mx11m pillars and the vein has become uneconomic, the stope expansion finishes and the splitting of the 11mx11m pillars with 5m adits begins, leaving at the end, in a similar process, only 3mx3m pillars (Fig. 5). At this point it is likely that the stope is close to the safety limits, only remaining the work to clean the finest material with high WO₃ grade that is still on the floor. Finally, the area is abandoned.

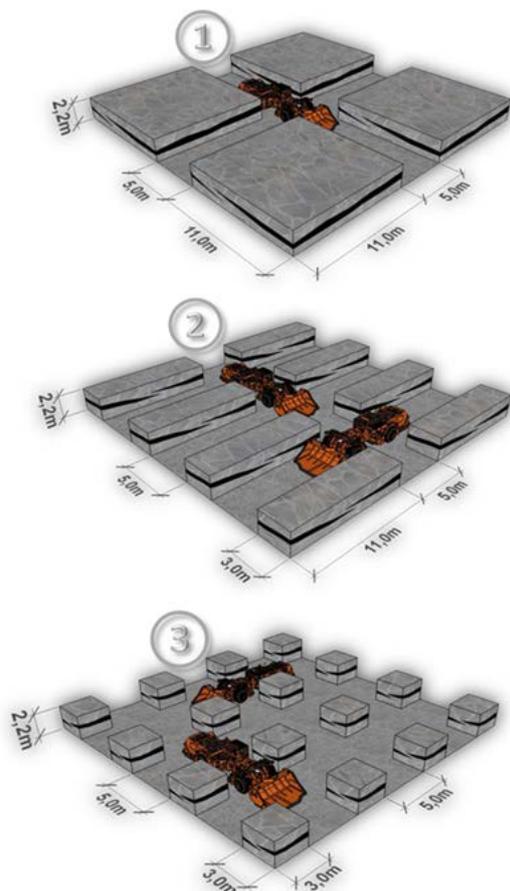


Fig 5. Stope structure. (Source: Beralt Tin and Wolfram Portugal).

Currently the mine is making fifty to sixty blasts per day to get a usual ROM (run of mine) of three to four thousand tonnes per day. The mine is usually functioning five days per week in two shifts. The third-shift time is used to ventilate. The air goes inside by many points, some of them not even known, once there were many entrances and shafts made and then later abandoned. Usually the mining engineers “only” have to drive the air, which is pumped in through a shaft in Vale de Ermida, closing and opening the different galleries.

EXPLORATION

The exploration work is always the first and fundamentally, a task that can drive a mining project to become a mine. This type of work is also the only one that can maintain and extend the life of any working mine.

Usually, when the exploration work finishes, it means that the end life of that mine is being prepared. Panasqueira is not an exception but as usual there are some specific characteristics that turn these mines into very special ones.

The main exploration in Panasqueira is the core drill holes and the “inclines”. The core drill holes are usually done in intersections of drives with panels, making a mesh with about 50x100 metres, and occasionally inside strategic stopes.

The normally regular length of core drill holes is usually 60 metres to investigate the level below and/or above. The exception was the study of level 3 of the mine that is 90 metres and so the drill holes were longer.

As it has indicated previously, “inclines” are galleries opened up inside a vein, following intersections of the veins by the drill holes. These galleries (“inclines”) allow a visual contact with the vein, making possible to measure grades and to do a detailed evaluation of it to support a decision about whether to open a stope (pillars of 11x11 meters) or if the area is declared non-economic and it’s abandoned immediately.

The core drill-hole records have been carried out since 1946, throughout the Panasqueira/Barroca Grande area, as can be seen in Table 2.

YEAR	METERS DRILLED
1946 - 1950	4.707,71
1951 - 1960	17.673,70
1961 - 1970	17.772,06
1971 - 1980	32.839,36
1981 - 1990	41.590,26
1991 - 2000	3.987,07
2001 - 2010	7.600,96
2011 - 2018	21.221,56
TOTAL	147.392,68

Table 2. Drill holes done in the Panasqueira/Barroca Grande area. (Source: Beralt Tin and Wolfram Portugal).

The exact location of these drills holes as well as their technical results were systematically measured by the topographic team and registered in books. This information was then used to make the plans and sections.

As already mentioned, the information obtained over the lifetime of the mines is an important key for the current mines. During many years Beralt Tin and Wolfram Portugal had a large “Studies Department” where many people worked to give form to accurate paper records, plans and sections. This information is vital when taking decisions about the best plan to mine. These documents have been preserved, and it is possible to access them even now.

All this huge amount of information started to be gathered in an informatic database in 2004, a challenge for the people that worked on it due to its dimension.

Currently, only an update on a monthly basis with the performed work and the results is required. The most important technical characteristics registered by the geology department are the lithology, vein intersections and their thickness, vein mineralogy, with reference to the amount of minerals presented and structural aspects. An empirical classification from 0 to 6 referring to all the observed minerals was created, in the core vein intersections with the purpose of quantifying it.

The geological exploration work at the Panasqueira mines was always very complicated. If, on the one hand, the presence of quartz veins is a very good guide and represents the possibility of finding wolframite, on the other hand the presence of quartz is not a guarantee that the wolframite will be also be present and so there can be “good” or “bad” quartz veins as far as the wolframite content is concerned.

This means that only when galleries (“inclines”) are opened will it be possible to get an idea about the economic quality of that vein.

EXPLORATION UNTIL THE 1950s

It is certain that at the beginning the exploration was done at the surface and consisted essentially on the visual discovery of the vein outcrops.

Most of the information from this period was lost and from that time what happened can only be estimated from the waste piles dispersed in front of the old gallery entrances all along the mountain with very different sizes and volumes (Fig. 6).

Nevertheless, the history of the Panasqueira mines demonstrates that it always had surface and underground exploration.



Fig 6. *Waste piles over the old gallery entrances – Panasqueira Village. (Source: photography from the authors).*

Most of the waste rock stayed inside the exploitations, filling the walls and supporting the roofs (2 meters height) of the mined area (Fig. 7).



Fig 7. *Old adit with rock wall made of waste. (Source: photography from the authors).*

The waste volume amounts produced are a good unit of measurement of the quantity and/or quality of the exploited vein and will usually give us a good idea about the success of each exploitation.

As most parts of the veins are sub-horizontal, the vertical ventilation shafts were, during many years, a powerful way of exhibiting the quartz and were consequently an exploration method to find new veins in the proximity of the stopes being exploited. These shafts allow us to check in situ the veins and to obtain a better definition of their probable WO_3 productivity.

EXPLORATION IN THE 1950s - 1990s

During this period there was a big development of the exploration work, not only by the described drill holes and “inclines” but also by some traditional methods (geological mapping, stream sediments, soil geochemistry and rock sampling) in a much larger area than the Panasqueira zone.

It was also during these years that the “Glory Holes” of Vale de Ermida were dug, in a successful attempt to increase the production of cassiterite concentrates (Fig. 8).



Fig 8. Glory Holes – Vale de Ermida area. (Source: photography from the authors).

The company acquired core drill-hole machines and has operated them during many years, not only underground but also on the surface. One good example of this is a Longyear 44 that still exists, although no one today knows how to operate it, since it works with a tripod.

Apart from the exploration work done to find new areas, the exploration operations inside the mine have never stopped. This approach has a high relevance for the mine development work as it was always recognised by the technical teams of the Panasqueira mines. This has shown to be a correct vision of the future and allowed the Panasqueira mines to survive in the darkest periods of low concentrate prices at the end of this time period.

Another piece of evidence of this correct vision from the future was the acquisition in 1979 of a Raise Borer Robbins 44 that is still working at the mine and that gave versatility to the mine exploitation and mine management. This acquisition also allowed the teams to finish one of the most dangerous jobs in the mine – the opening of vertical shafts, which were made by hand, with hydraulic hammers, from bottom to top.

RECENT EXPLORATION

From the 90's to the present day and in addition to the traditional drill holes, there was other exploration work done with the aim of getting a better understanding, not only of the ore distribution, but also of finding and understanding the genesis and to obtain new guides to increase the life of the mine.

These methods include litho geochemistry, geophysics and exploration drill holes in green-field zones, were carried out, not only within the area of the mining license but also in an exploration area that surrounded the mining license area.

This exploration work was based on the knowledge acquired throughout the life of the mine, not only by several technical and scientific studies carried out in the Panasqueira mines but also by all the observations and field data, collected daily from the mine.

One of the facts that can be observed in the mine is that there are clearly different zones richer in SnO_2 or in WO_3 (D'Orey, 1967; Kelly and Rye, 1979; Lourenço, 2002, 2006).

The same happens with several other minerals and it expectable relations between minerals assemblages can be observed (Conde *et al.*, 1971) such as topaz and fluorite with cassiterite, which have spatial relationships that are very well defined. It was verified that the Panasqueira mines have: (i) a rich tin zone in the Vale de Ermida, (ii) the northern area of the mine, around the well-known greisen intrusion, and (iii) the SW part of the actual mine.

The study of old data, such as the WO_3 grades mined, has allowed us to verify that the central zone of the actual mine, around D19 and level 1-2, has higher grades than the average of the mine. To understand how the WO_3 distribution is in the mine, several studies were carried out indicating, in many opinions, that another greisen/granite cupola must be present (Pinto, 2014; Pinto *et al.*, 2014) but that has not yet been found.

In order to obtain a surface geochemistry signature of the lithologies present in the underground, a large surface litho geochemistry sampling and magneto-telluric geophysics campaigns was made.

Some electric and electromagnetic exploration in underground was also tried. This work was done during the weekends to have the least anthropogenic influence possible, but anyway the water, rails and some electric cables that cross the galleries made the methods inappropriate.

Based on the acquired knowledge, some deep drill holes were made to try to find any evidence of the “new” greisen or at least a package of veins. These three drill holes, in total 1.732,10 meters, were negative.

Not even spotted schist was intersected and the existing veins were scarce and small, usually less than 10 centimetres.

GEOLOGY IN RELATION WITH MINING

In a mine where the geology team only has one full time geologist, it is very important to have a good work team and a great relationship with the mining engineers and miners.

It is only possible to manage a profitably work at the Panasqueira mines if a very small technical team has

strong, good communication skills and if the problems are correctly shared between the different areas. It is normal to see the geologist talking with the mining engineer about any mine problem or about any geological problem. It is also very common to see the geologist or the mining engineer exchanging their ideas and plans to facilitate some work of the other departments.

These very good relationships do not stop at the end of the working day therefore it is common that some of the technical team have dinner together or organize barbecues in their houses or promote social activities with other workers (Fig. 9). Nowadays, the investment by the mining companies in social and cultural purposes is crucial and, in some cases, the key for success.



Fig 9. Mining friends “meeting”. (Source: photography from the authors).

Only with this strong union it’s possible to keep the mine going forward. The relationships are usually more than just work relationships.

To remark, that sharing these active discussions and issues with different technical areas, give to the geologist a much greater knowledge about common mine problems that many times help to understand what might be more useful for the geology teamwork, saving time and money.

It also works as a continuous formation for a geologist in areas that, even if they are not exactly about geology, they are very close and make the geologist better prepared to get useful information and to have a greater productivity.

These kinds of relationships are responsible for the survival of a such big mine as the Panasqueira with so small technical team (i.e. one full time geologist).

GEOLOGY IN RELATION WITH THE PLANT

Equally important as the relationships with the mine are the ones with the plant. This is a point that the geologist

usually tends to forget and not give so much importance to, but for the success of a mine, it is very important that the geologist understands the plant processes and that he/she makes the metallurgists understand the details of the ores existing in the mine.

In the Panasqueira mines, the geologist and the plant manager usually talk about ore feed and plant results, working together to achieve a good performance. If something strange or different happens in the ore treatment it is certainly discussed with the geologist, as well as if the geologist finds something different in the mine, he/she will communicate it to the plant manager responsible for preventing eventual issues.

A good example is what happened with the cassiterite concentrate, when it was verified that it was lighter than normal. At that moment, normally the cassiterite would not come separately from another white mineral that visually, at the shacking tables, might be identified as quartz. The chemical analysis was not much help either since it only gave a high Si content.

The discussions with the mine staff and some quick studies were able to identify the mineral as topaz, which appears at the end of the gravity plant process together with cassiterite due to hydrostatic forces. To break these hydrostatic forces, a fast solution was used with success, something as simple as a washing up detergent.

GEOLOGY TASKS IN THE PANASQUEIRA MINES

The geology tasks in the Panasqueira mines are quite diverse. They can be divided between the exploration and the support to the exploitation.

The exploration tasks have already been partly explained before and comprise surface exploration, but also the underground exploration that usually is more related with the near future.

The Panasqueira mines have two small drill rigs working now, one is an Atlas Copco – Diamec 252 core drill rig that can drill more than 100 metres (Ø46mm) per hole (Fig. 10).



Fig 10. Atlas Copco – Diamec 252. (Source: photography from the authors).

This machine tries to find new exploitable areas detailing previous scarce existing information. Usually these drill holes try to upgrade resources from inferred to indicate or to give indications regarding veins that are currently being exploited.

The second drill rig working is a small Hilti DD750 that gives support to the mining work as it can drill until about 12 metres with a diameter of Ø46mm. This machine allows the miners to do a quick search for veins that have disappeared or have been displaced by faults or for some other reason in the exploitation front. It also allow the miners to investigate the existence of other veins immediately above or below the stopes in order to optimize the exploitation and not miss eventual possible veins existing in the proximity of the stopes.

All the drill-hole data is added to the database and represented in plans and sections. These documents are the base of the daily work at the mine and the resource/reserve calculations done every six months.

The Panasqueira mines have an extreme nugget effect, which is the reason why a normal front sampling with chemical analysis, and/or classification when the mine is advancing, is not effective. The following picture shows how this nugget effect can be tricky and lead to wrong decisions if based only on chemical analysis (Fig.11).



Fig 11. Distinct possible drill hole intersections. (Source: photography from the authors).

This is the reason why it is so important to have a clear description of the veins and define the real thickness of the vein.

Other aspects are also very important to drive the mine forward, and the present and past geological knowledge is essential for developing the different work. Some decades before a formula was developed, called the “D9 formula”, which correlates the thickness of the veins with an expectable grade.

The last attempt to provide a reliable prediction of grades from intersected veins by drill holes was done around 2014-2015 when an academic approach was developed to determine a formula to predict grades. Many factors had been integrated but it did not perform as expected. When tested to check this study, the

expected grades did not correspond to the ones found when an “incline” was opened.

So, at this moment the Panasqueira mines still work with the old “D9 formula” not as a correct number but as an indication to be added with to other geographic and geological indications. This still seems to be the best approach to reality.

Notwithstanding, if the chemical analysis is not effective, some other way must be found to get a good idea of the grade control in the exploited fronts.

The solution was a grade calculation by a formula that uses the area of the visible crystals of wolframite and the height and width of the stope. There is a team of two workers from the geology department that goes daily to the mine to do this work, reporting the results found twice a month, by stope, as shown in Table 3.

This is called the measure of “pintas” that means something close to wolframite points.

JANUARY							
STOPE ID.		1st Sampling (1st + 2nd weeks)					
L. D. R. AW.	m ²	Linear meters	Grade (Kg/m ³)	Vein Thickness (cm)	Height (m)	Width (m)	Med.
0 22 13 AW02	184	106	14,0	32	2,1	4,7	18
0 13 15 AW06							
LEVEL 0	184	106	14,0	32	2,1	4,7	18
1 25 13 AW11	1062	544	8,3	27	2,3	4,7	109
1 5 7 AW15	2576	1368	25,3	27	2,4	4,7	262
LEVEL 1	3638	1912	20,5	27	2,3	4,7	371
2 29 13 AW21	200	110	20,5	57	2,5	5,0	18
2 29 5A AW23	402	219	15,1	23	2,1	4,6	42
LEVEL 2	601	329	16,9	34	2,2	4,7	60
3 15 0 AW32	322	177	7,5	21	2,3	4,3	35
LEVEL 3	322	177	7,5	21	2,3	4,3	35
TOTAL	4746	2524	18,8	28	2,3	4,6	484

INCLINE ID.	m ²	Linear meters	Grade (Kg/m ³)	Vein Thickness (cm)	Height (m)	Width (m)	Med.
I0 D13 R23 I.5	139	54	2,7	17	2	5	15
L2 D1 MDW I.1	182	73	17,0	25	3	5	19
TOTAL	321	127	10,9	22	2	5	34

PILLARS ID.		Grade (Kg/m ³)	m ²	Vein Thickness (cm)
0 13 15 AW06		10,5	464	31
1 13 13 AW11		9,3	102	24
TOTAL		10,3	566	30

Table 3. Example of “pintas” results. (Source: Beralt Tin and Wolfram Portugal).

CALCULATION OF THE RESOURCES

The calculation of the resources in the Panasqueira mines is not done with any geological software, not because the ALMONTY group does not have it (Los Santos, Valtreixal or Sangdong use it), but due to the specific characteristics of the mineralization of the Panasqueira mines and the historical good approaches achieved throughout the years.

With this approach, the task is easier to do with less specific software such as AutoCAD and Excel.

In Panasqueira, the resource reconciliation is done every six months. This work recalculates the inferred, indicated and measured resources.

During many years this work was done with the database referring to 30 June and 31 December. From two years ago until the present, and because the financial year of

the Almonty Group ends at 30 September, this work is done with the data from 31 March to 30 September.

To sum up, inferred resources are obtained with one vein drill intersection over 18 cm and have an influence of a square with 34m if the vein is between 18-30 cm or 50m if the vein is wider than 30cm. Indicated resources are all the areas where the influence areas of two or more drill holes give any superposition.

The measured resources are defined by an influence area of a vein exposed by a gallery with a measured grade over the cut-off grade of the mine – the Virgin Area, or Pillars. Each pillar has an area and an average grade, and thickness calculated by the surrounding measures made.

During many years, Panasqueira only had three different types of resources (inferred, indicated and measured) and did not do any table with reserves, rather assuming measured resources as proved reserves.

From 2006 onwards, there has been the first competent person who has changed the criteria and decided to create probable resources which are also probable reserves.

More recently, and with the same known criteria from several decades, it was decided to obtain the usual tables of resources and create an independent table with reserves. The reserve table produced has two categories, proved and probable reserves.

Therefore, the current reconciliation work done in the Panasqueira mines is in accordance with the Canadian National Instrument 43-101 (Wheeler, 2016).

The proved reserves are defined by pillars and the probable by what we call a “Virgin Area” constituted by the advance of the mine where a pillar has not yet been formed.

This means that to obtain the proved reserve a grade control over four sides of the pillars with 11m side is needed, and to obtain the probable reserve only the visual access to the sides and face of a gallery is needed.

All the results are presented multiplied by 0.84, which represents the really mined volume of a stope once it has the 3x3m pillars that will “never” be exploited. 16% remains at this stage of the stope.

MONTHLY RECONCILIATION

All the geology, mine and plant numbers are checked monthly with the elaboration of a “Survey Report”. This “Survey Report” shows and compares all the numbers defined by the different departments, presenting a number that corresponds to a relationship between them at the end of each month. This number is called the “Mine Call Factor”.

This value will be preferentially near 100 but, if it shows a trend to be higher or lower, it needs to be checked in order to understand the reasons why and to get a logical explanation for this different behaviour.

When this happens, some corrections must be proposed. Nevertheless, nothing changes until the problem is understood and so we always need to have a strong tendency to implement changes.

CONCLUSIONS

The Panasqueira mines are very old mines that have always successfully tried to keep innovation side by side with tradition.

It is not possible for the present staff to think they are cleverer than the previous ones who worked there. Essentially, there are only more tools and accumulated knowledge than at the beginning of the mines.

The 43-101 rules, based on the history of the mine, is proof that this is the correct approach, nowadays there is an acceptance of the many special characteristics of the Panasqueira mines.

Moreover, it is not possible to forget the technical evolutions and that mines must be always open to new methods and approaches.

Nowadays some projects are being attempted, such as the one that is testing an increase in the recovery from waste by the use of ore sorters, or another one that is trying to recover metals from the tailings by bio methods.

The environmental problems are also a big concern and priority for the Panasqueira mines. The work is being carried out not only to solve the ones that arise from the actual exploitation as well as trying to reduce the ones that come from the past.

Unfortunately to keep the mine running profitably and allow the payment of the salaries to almost 300 people, it is important to not lose focus on the production, which is why it is difficult to get general visits to the mines.

Finally, and as always, it is important to mention the well known mineral crystals from the Panasqueira mines. The mines have a store that sells them and is open on working days. The profits of these sales go entirely to all the workers as a gift, at Christmas time. However, the illegal sale of these minerals is still a big issue at Panasqueira, not only because of the injustice created between the people who take them and the people who do an honest job but also because of the high number of work hours lost when miners are looking for crystals and not working. The cavities of the crystals are usually “cleaned” even if the safety conditions in the area are still not assured.

REFERENCES

- Conde, L. N., Pereira, V., Ribeiro, A., Thadeu, D. (1971): Jazigos hipogénicos de estanho e volfrâmio. I Congresso Hispano-Luso-Americano de Geologia Económica. Direção Geral de Minas e Serviços Geológicos. Lisboa. 81 p.
- D'Orey, F. C. (1967): Tungsten-tin mineralization and paragenesis in the Panasqueira and Vale de Ermida mining districts, Portugal. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, **52**, 117-167.
- Kelly, W. C. (1977): The relative timing of metamorphism, granite emplacement and hydrothermal ore deposition in the Panasqueira district (Beira Baixa, Portugal). *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, **61**, 239-244.
- & Rye, R. O. (1979): Geologic, fluid inclusion, and stable isotope studies of the tin-tungsten deposits of Panasqueira, Portugal. *Econ. Geol.*, **74 (8)**, 1721-1822. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.74.8.1721>
- Lourenço, A. (2002): Paleofluidos e mineralizações associadas às fases tardias da Orogenia Hercínica. Tese de Doutoramento. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 326 p. <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/9798>
- (2006): O Granito da Panasqueira (Cúpula da Barroca Grande). Estudo de um sistema granítico associado a mineralizações de estanho. VII Congresso Nacional de Geologia – Universidade de Évora, 187-190.
- Pinto, F. (2014): Estudo da distribuição do estanho na Mina da Panasqueira. Master Thesis, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 236 p. DOI: 10.13140/RG.2.1.3263.5602.
- , Vieira, R., Ferraz, P., Noronha, F. (2014): Estudo da distribuição espacial do Sn no jazigo de W-Sn-(Cu) da Panasqueira. *Comunicações Geológicas*, **101 (2)**, 829-832. <http://www.lneg.pt/iedt/unidades/16/paginas/26/30/185>
- Reis, A. C. (1971): As Minas da Panasqueira. *Boletim de Minas*, **8 (1)**, 3-44.
- Thadeu, D. (1951): Geologia do Couto Mineiro da Panasqueira. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, **32**, 5-64.
- Vaz Leal, M. (1945): As Minas da Panasqueira – Vida e História, Lisboa, Portugália Editora, 177pp.
- Wheeler, A. (2016): Technical report on the mineral resources and reserves of the Panasqueira Mine, Portugal. 156 p. https://almonty.com/wp-content/uploads/2019/06/Panasqueira_43-101_Tech_Rep_Dec16_SEDAR.pdf [consulta: 30 abril 2019].

La mina de Penouta, minería sostenible para el abastecimiento de Ta y Nb en Europa

Teresa Llorens González (1*), Verónica Mateos Aquilino (1), Francisco García Polonio (1)

(1) Strategic Minerals Spain, S.L. Carretera OU-0901 kilómetro 14, 32558, Penouta-Viana do Bolo, Ourense (España)

* corresponding author: tllorens@strategicminerals.com

Abstract:

The Penouta Mine (Ourense, Northwestern Spain) was one of the most important tin mines in Spain until its closure in 1985, leaving important concentrations of tin and strategic metals for the European Union, such as tantalum and niobium, accumulated in the mining wastes deposited in the tailings and dumps, which were abandoned without any type of restoration. Since the beginning of 2018, Strategic Minerals Spain operates the gravimetric concentration plant that reprocesses these mining wastes, obtaining tin and tantalum-niobium concentrates for the international market. The full exploitation process aims to revalorize around 80% of these mining wastes with the production not only of metallic minerals, but also of industrial minerals (quartz, feldspar, mica and kaolin), in such a way that the original mining wastes will be greatly reduced, thus facilitating the environmental restoration work, with which it is expected to return a good ecological quality to the area. The Penouta mine project aims to be a benchmark for sustainable mining, valorizing an abandoned mining waste and generating economic, environmental and social benefits, within the framework of the circular economy.

Resumen:

La mina de Penouta (Ourense, noroeste de España) fue una de las minas de estaño más importante de España hasta su cierre en 1985, dejando importantes concentraciones de estaño y metales estratégicos para la Unión Europea, como tantalio y niobio, acumulados en los residuos mineros depositados en las balsas de lodos y escombreras, abandonadas sin ningún tipo de restauración. Desde principios de 2018, Strategic Minerals Spain opera la planta de concentración gravimétrica que reprocessa estos residuos mineros, obteniendo concentrados metálicos de estaño y de tantalio-niobio dirigidos al mercado internacional. El proceso de aprovechamiento completo pretende revalorizar en torno al 80% de estos residuos mineros con la producción no solo de los minerales metálicos, sino también de minerales industriales (cuarzo, feldespato, mica y caolín), de tal modo que los estériles que originalmente ocupan estas balsas y escombreras se reducirán en gran medida, facilitando así las labores de restauración ambiental, con la cual se espera devolver al área un grado de calidad ecológica que hoy no tiene. El proyecto de la mina de Penouta pretende ser un referente de minería sostenible, poniendo en valor un residuo minero abandonado y generando beneficios económicos, ambientales y sociales, en el marco de la economía circular.

Palabras Clave: Penouta, Metales Críticos, Revalorización, Economía Circular. | **Key Words:** Penouta, Critical Raw Materials, Revalorization, Circular Economy.

INTRODUCCIÓN

El proyecto de Penouta se localiza en el noroeste peninsular, concretamente en la provincia de Ourense, en la comarca de Viana do Bolo. En esta zona se localizan las antiguas balsas y escombreras de la mina de Penouta, una mina abandonada a mediados de los 80 sin ningún tipo de restauración ambiental. Estos materiales conforman el Permiso de Aprovechamiento de la sección B, con 184 hectáreas de extensión y consistente en una serie de balsas y escombreras. Bajo este permiso y alrededor del mismo, ocupando 36 cuadrículas mineras, se localiza el permiso de investigación Coneto (sección C), dirigido a la investigación de la mineralización en el depósito original de la antigua mina (Fig. 1).

La mina de Penouta fue una de las minas de estaño más importantes de España. Históricamente, la minería en el área de Penouta se ha llevado a cabo desde la época de los romanos, con pequeños túneles que seguían las vetas de cuarzo mineralizadas de casiterita encajadas en el leucogranito albitico. La minería en el depósito de Penouta está documentada desde 1906, pero no se explotó extensivamente hasta la década de 1970, principalmente para obtener casiterita de la cúpula granítica y de la red de venas de cuarzo hidrotermales, mientras que el Ta se obtuvo como subproducto. La extracción durante este período se llevó a cabo mediante métodos a cielo abierto, enfocados específicamente en el leucogranito caolinizado y aquellas partes de la roca encajante que habían sido moscovitizadas y eran lo suficientemente blandas para ser extraídas usando equipos de arranque mecánico como palas y rascadores.

La planta de concentración gravimétrica carecía de trituración y molienda previa, de modo que únicamente se trataron las fracciones inferiores a 2 mm, por lo que una gran cantidad de minerales Sn y Ta-Nb no fueron liberados de la ganga y fueron acumulándose progresivamente en las escombreras, las cuales fueron abandonadas tras el cierre de la mina sin ningún tipo de restauración. Como consecuencia, las arenas de relave llegaron a acumular leyes similares a las del yacimiento primario. Algo similar ocurrió con las fracciones menores de 1,5 mm, que eran arrastradas por el agua de lavado, depositándose en las balsas de decantación.

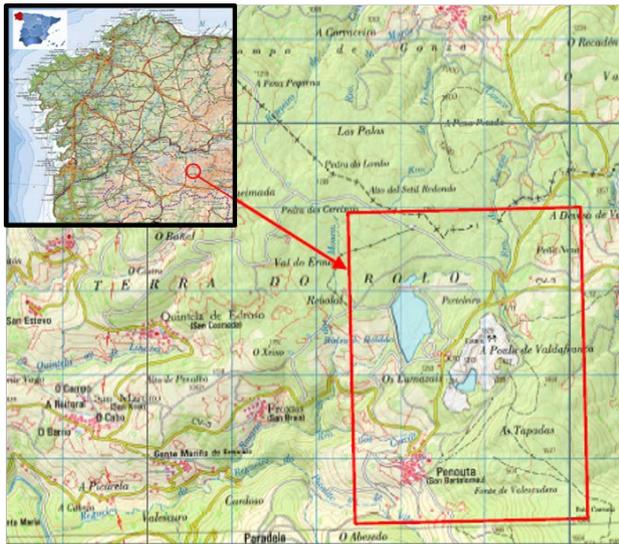


Fig 1. Localización del proyecto de la mina de Penouta (elaborado a partir de información del Instituto Geográfico Nacional, <https://www.ign.es/web/ign/portal>).

Desde 1961 hasta 1985, se llevaron a cabo varios proyectos de exploración en el granito de Penouta, junto con estudios de viabilidad y campañas de perforación, incluido el estudio no solo de casiterita sino también de minerales de Ta-Nb. Estos incluyen proyectos de estimación de minerales y evaluación de los lodos, junto con varias campañas de perforación para investigar los recursos y la viabilidad del proyecto minero, que resultaron en una estimación de 13 Mt de reservas, con leyes promedio de 750 ppm de Sn y 90 ppm de Ta (ADARO, 1982, 1985). Sin embargo, la caída de los precios de los metales llevó al cierre definitivo de la mina en 1985, tras ser adquirida por diferentes propietarios.

Como consecuencia de un proceso de separación tan ineficiente, estos residuos mineros aún contienen cantidades interesantes de metales, como Sn, Ta y Nb. La reactivación de la minería en los últimos años alentó a Strategic Minerals Spain (SMS) a desarrollar una nueva exploración del depósito de Penouta, lo que ha permitido la estimación de los recursos minerales tanto en el depósito original restante (95,5 Mt de recursos minerales medidos e indicados, con calificaciones promedio de 77 ppm Ta y 443 ppm Sn) como en los antiguos residuos mineros, donde la compañía ha iniciado operaciones (12 Mt de recursos con

calificaciones promedio de 35 ppm Ta y 428 ppm Sn) (Fig. 2).



Fig 2 Distribución de las diferentes zonas de explotación de la Sección B de la mina de Penouta (elaborado a partir de información del Instituto Geográfico Nacional, <https://www.ign.es/web/ign/portal>).

CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

La mina de Penouta se localiza en el sector nororiental del Cinturón Varisco peninsular, concretamente en la Zona Centro-Ibérica, donde afloran dos formaciones principales: la Serie Viana do Bolo (rocas metamórficas de alto grado, compuesta por gneises bandeados de tonalidades oscuras y ortogneises glandulares más claros, así como esquistos granatíferos) y la Formación Olo de Sapo, caracterizada por una secuencia volcanogénica que consiste principalmente en gneises glandulares (Montero *et al.*, 2009; Díez Montes *et al.*, 2010), siendo en estos gneises glandulares donde intruye el leucogranito de Penouta, un pequeño cuerpo leucocrático de origen magmático tardío (Fig. 3).

Se trata fundamentalmente de una cúpula granítica albitizada y greisenizada, con forma de lámina alargada en dirección SO-NE, con una longitud máxima de aproximadamente 1100 m y una anchura máxima EO de 700 m. El cuerpo se extiende hasta más de 200 m de profundidad. La mineralización consiste en casiterita y minerales del grupo de la columbita finamente diseminados en todo el granito, aumentando los contenidos y el tamaño de grano de los mismos hacia la zona apical, donde tiene lugar una caolinización intensa del granito (López Moro *et al.*, 2017; Llorens *et al.*, 2017; Alfonso *et al.*, 2018).

Dicho granito está compuesto mayoritariamente por albita y cuarzo y, en menor proporción, mica blanca. En algunas zonas del depósito la albita alcanza proporciones del 60%, lo que confiere a este granito un extraordinario color blanco.

En ocasiones, se pueden encontrar diques pegmoplíticos bandeados en la zona apical de la cúpula

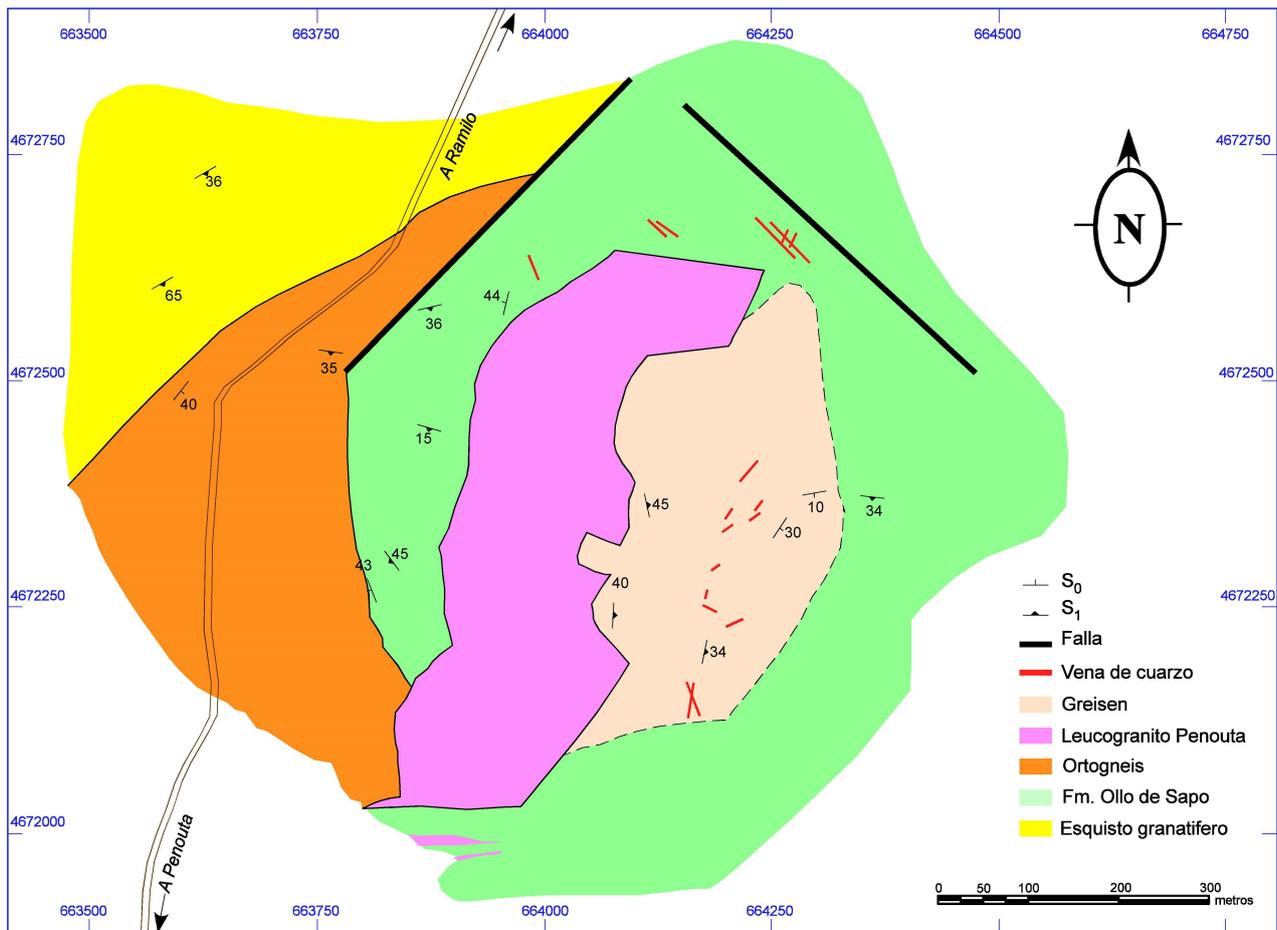


Fig 3. Mapa geológico del granito de Penouta. Modificado de López Moro et al (2017).

granítica, que también contiene minerales de Sn-Ta-Nb. El sistema de cúpula culmina con el desarrollo de un stockwork de vetas de cuarzo de hasta 2 m de espesor que contienen casiterita de grano grueso. La cristalización de estas vetas de cuarzo se produjo simultáneamente con una fuerte greisenización del gneis glandular y, en menor medida, de la cúpula granítica, lo que dio lugar al desarrollo de un greisen de distribución irregular en toda la zona este del depósito. Dicho greisen contiene mineralización de casiterita de mayor tamaño de grano junto con sulfuros como esfalerita y molibdenita.

TRABAJOS DE EXPLORACIÓN

SMS ha realizado en estos años un gran esfuerzo por conocer en profundidad la problemática del yacimiento y su entorno, llevando a cabo numerosas campañas de exploración e investigación geológica para la determinación de los recursos explotables:

- Estudios topográficos.
- Cartografía geológica de detalle.
- Estudios geotécnicos e hidrogeológicos.
- Calicatas.

- 30.000 m de sondeos con recuperación de testigo y circulación inversa.
- Análisis geoquímicos de roca total, que incluyen los metales de interés y otros elementos trazas.
- Estudios petrográficos y mineralógicos.
- Ensayos metalúrgicos.

Todo ello se ha realizado bajo un estricto control de calidad, lo que ha dado lugar a la modelización del yacimiento, el cálculo de recursos y la evaluación de los mismos, tanto para los materiales de la sección B como para la sección C (Fig. 4).

Con estos resultados ha sido posible la certificación de los recursos, tanto en sección B como en sección C, por dos empresas cualificadas independientes de reconocido prestigio internacional, Metal Mining Consultants y SRK. Así, las balsas y escombreras de la Sección B cuentan con 12 Mt de recursos minerales indicados e inferidos, con una ley media de 428 ppm de Sn y 35 ppm de Ta. Habida cuenta de que las escombreras no han sido estudiadas en detalle, es importante indicar también que su potencial está muy subestimado.

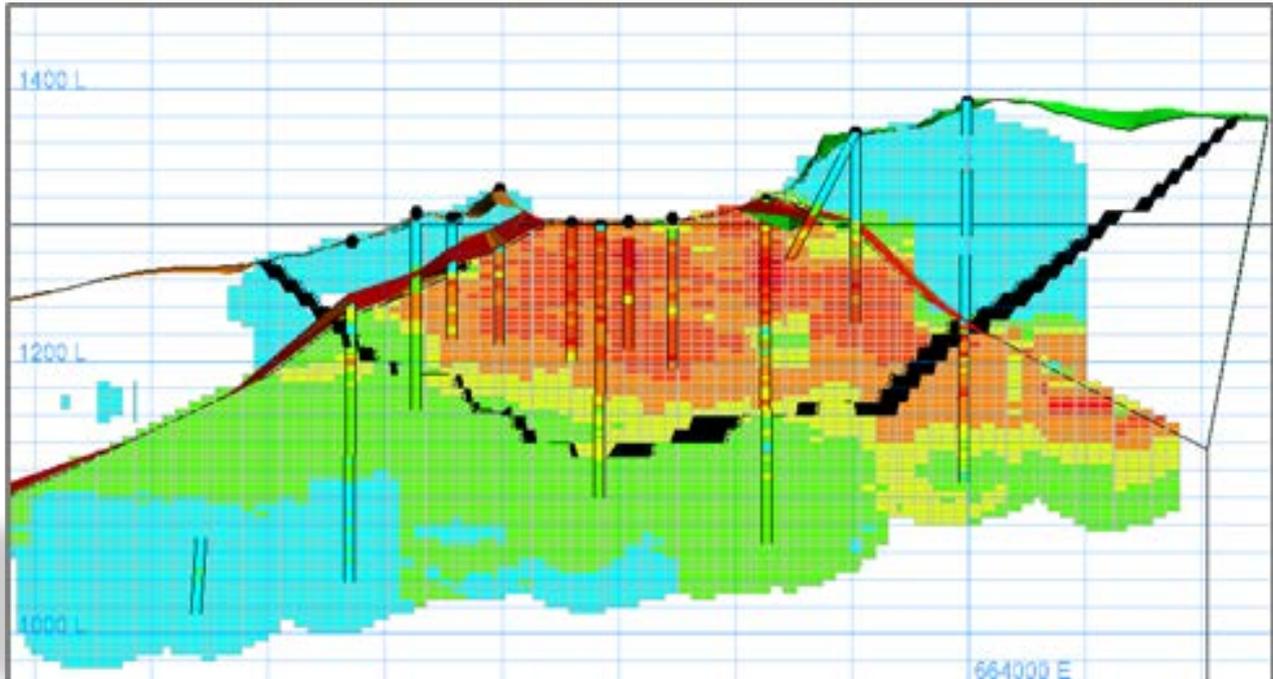


Fig 4. Modelización de recursos de tantalio en el leucogranito de la sección C. Leyenda: azul 0-35 ppm; verde 35-65 ppm; amarillo 65-80 ppm; naranja 80-100 ppm; rojo >100 ppm (información interna, publicada con la autorización de Strategic Minerals Spain, S.L.)

Por su parte, la sección C cuenta con más de 95 Mt de recursos medidos e indicados, con una ley media de 443 ppm de Sn y 77 de Ta, además de 61 Mt de recursos inferidos, con leyes medias muy similares.

SMS también ha realizado estudios para diseñar el plan de explotación y la ingeniería de detalle, que derivaron en el diseño y construcción de una planta de concentración gravimétrica optimizada, que permite el máximo uso y valorización de estos residuos.

UN PROCESO SOSTENIBLE EN EL MARCO DE LA ECONOMÍA CIRCULAR

La tantalita y la columbita son, respectivamente, las principales fuentes de Ta y Nb en la mina de Penouta. Gracias al desarrollo de nuevas tecnologías y la evolución de las antiguas técnicas de separación de minerales, hoy en día es posible recuperar los metales de interés contenidos en estos residuos mineros. Es por eso que SMS ha invertido un gran esfuerzo en la construcción de una planta de procesamiento para estos materiales mediante la aplicación de las mejores técnicas industriales disponibles (Fig. 5).

Durante el procesamiento de estos residuos se obtiene alrededor de un 1% de concentrados de Sn y de Ta-Nb, que se venden a compañías internacionales que procesan la materia prima para generar compuestos intermedios, los cuales sirven para producir componentes altamente específicos. En este proceso se genera un 99% de los estériles, compuestos principalmente de minerales silicatados susceptibles de ser nuevamente reprocesados, lo que permite recuperar alrededor de un 70% de los

mismos en forma de minerales industriales, como son cuarzo, mica, feldespato y caolín. El objetivo es lograr la revalorización de alrededor de un 80% de los antiguos residuos mineros acumulados en las balsas y escombreras. El residuo final de este proceso será utilizado como material para la restauración ambiental.



Fig 5. Área de clasificación y molienda de la planta de procesamiento de la mina de Penouta.

La planta de proceso de la mina de Penouta está diseñada para tratar un millón de toneladas por año de material de alimentación procedente de estas balsas y escombreras, y se basa fundamentalmente en un proceso de separación gravimétrica y magnética para extraer los minerales de Sn, Nb y Ta.

Las principales etapas este proceso son:

- Clasificación y molienda: clasificación por tamaños y molienda del mineral hasta alcanzar el tamaño de liberación de los minerales de interés.

- Concentración gravimétrica: tanto la casiterita como los minerales del grupo de la tantalita tienen una alta densidad, por lo que se concentran utilizando una combinación de espirales y mesas de sacudidas (Fig. 6).
- Separación magnética de baja intensidad: Esta etapa sirve para eliminar impurezas de hierro, procedentes tanto de minerales (biotita, óxidos...) como de la erosión de los elementos de molineta. En este punto se obtiene un concentrado mixto de Sn, Ta y Nb.
- Secado del concentrado mixto.
- Separación magnética de alta intensidad: en esta fase se obtiene un concentrado no magnético de casiterita y un concentrado paramagnético de Ta-Nb, ambos productos finales para la venta.



Fig 6. Concentrado mineral en las mesas de sacudidas.

El diseño de esta planta de procesamiento permite el uso eficiente de los recursos de energía y agua. El suministro de agua para la planta de explotación es posible mediante la captación de aguas superficiales de las antiguas balsas y del frente de explotación, actualmente inundado. La planta de procesamiento tiene un sistema de circuito cerrado de agua, por lo que la recuperación de agua alcanza el 70%, recirculando al circuito.

Al tratarse de un proceso exclusivamente gravimétrico, no hay productos químicos en los residuos generados. Estos son químicamente similares al material de alimentación, ya que solo se obtienen cantidades bajas de minerales metálicos y caolín durante el procesamiento. Igualmente, los contenidos en sulfuros son muy bajos, tanto en la roca parental como en los residuos a explotar, por lo que no se forman aguas ácidas por su tratamiento. Además, los residuos generados se utilizarán directamente en los trabajos de restauración, ya sea en el llenado de las balsas explotadas o en el relleno del antiguo frente de explotación.

La explotación de metales como Sn y, especialmente, Ta y Nb, en Europa es muy escasa o incluso nula, por lo que se puede considerar que la mina Penouta es la primera explotación activa de este tipo en Europa desde hace muchos años. El hecho de ser una minería libre de conflicto hace que el proyecto sea muy atractivo para los

posibles compradores de metales, no solo en Europa, sino también en Estados Unidos y Asia.

Los minerales industriales obtenidos en los ensayos piloto tienen una calidad igual o superior a los productos que ya están en el mercado, por lo que es fácil ganar una posición en este sector. No obstante, la apuesta de SMS es impulsar la inversión en I+D+i para el desarrollo de nuevas tecnologías y nuevas aplicaciones de los productos, tanto metálicos como no metálicos, que permitan abrir nuevos mercados nacionales e internacionales.

Cabe señalar que la mina está ubicada en un área social, económica y ambientalmente degradada de Galicia en la zona centro-oeste de la provincia de Ourense. La economía del medio rural disminuyó progresivamente después del cierre de la mina en 1985, de modo que la población simplemente sobrevive en base a una economía de subsistencia. Por lo tanto, la apertura de la nueva planta de procesamiento en Penouta supondrá, durante los 12 años de vida del proyecto de beneficio de las balsas y escombreras, una mejora progresiva de una economía rural degradada.

Por otro lado, la mina está adyacente a un área natural protegida, llamada Red Natura "Peña Trevinca". Cuando esta área natural fue declarada Red Natura 2000, la zona ocupada por la mina abandonada de Penouta fue excluida debido a su baja calidad ecológica. La futura restauración de estos residuos mineros abandonados dará como resultado un área con mejor calidad ecológica. Por lo tanto, un gran desafío para el proyecto consiste en alcanzar un grado de calidad tal que permita que el área se incluya en dicho espacio protegido, una vez cese la actividad minera.

Así, el proyecto de la mina de Penouta espera ser una referencia para la minería sostenible, en la cual los residuos mineros abandonados se valorizan para generar beneficios económicos, ambientales y sociales en el marco de la economía circular. No en vano, el proyecto de la mina de Penouta está incluido en varios documentos de la Comisión Europea dedicados a "critical raw materials" y a la economía circular, como ejemplo de buena práctica en la recuperación de minerales críticos a partir de residuos mineros (Blengini *et al.*, 2019).

MOTIVACIONES DEL PROYECTO

Son varios los factores que han motivado a SMS en este proyecto, entre los cuales podemos destacar los siguientes.

Recuperación de un área ambientalmente degradada

La mina Penouta se cerró definitivamente en 1985. La explotación se realizó mediante métodos a cielo abierto y

de manera poco selectiva. Los residuos mineros se depositaron en balsas y escombreras que fueron abandonadas tras la clausura de la mina sin ningún tipo de restauración. Por esta razón, el área minera tiene una baja calidad ecológica. La falta de suelo superior y la existencia de grandes pendientes son algunas de las razones que han hecho imposible la restauración natural.

Para cumplir con el objetivo de reducir y eliminar el impacto ambiental, SMS desarrolló voluntariamente un Estudio Pre-Operacional detallado en la mina Penouta y áreas aledañas (Strategic Minerals Spain, 2016) para utilizar esta información como punto de partida en base al cual aplicar mejoras. Estos trabajos, necesarios para diagnosticar la situación de la mina de Penouta desde un punto de vista ambiental, incluyeron estudios climáticos, de aguas superficiales y subterráneas (Fig. 7), de la flora y la fauna del lugar, de suelos y de la calidad del aire. Esta información ambiental se utiliza actualmente para llevar a cabo trabajos de control operacional y de restauración.



Fig 7. Ubicación de algunos puntos de revisión medio ambiental (elaborado a partir de información del Instituto Geográfico Nacional, <https://www.ign.es/web/ign/portal>).

A medida que la explotación progresa, las zonas explotadas se rellenarán con los estériles de la planta de proceso. Finalmente se aplicarán las técnicas de remodelación, esparcimiento de la capa superficial del suelo y siembra para revegetar el lugar. En este sentido, recientemente se han diseñado parcelas de control para el estudio de la mezcla de suelos, estériles y especies vegetales, y se realiza un seguimiento para aplicar la mejor técnica de restauración resultante. La recolección y conservación de semillas se está llevando a cabo desde el inicio de la explotación, y se creará un vivero con el objetivo de obtener información con anticipación para desarrollar adecuadamente los futuros trabajos de restauración.

Necesidad de impulso social y económico del medio rural.

La mina Penouta se encuentra en la aldea de Penouta, una pequeña localidad que pertenece al Concello de Viana do Bolo, en la provincia de Orense (España). La economía en esta zona se basa fundamentalmente en la agricultura tradicional, la ganadería y la silvicultura. El sector industrial es muy escaso.

En esta área, la población mayor de 60 años es la más abundante y hay un número reducido de jóvenes. El declive poblacional y económico del área ha sido constante, tanto en la aldea de Penouta como en el distrito de Viana do Bolo, desde los años 80, cuando se produjo el cierre definitivo de la mina Penouta (Fig. 8).

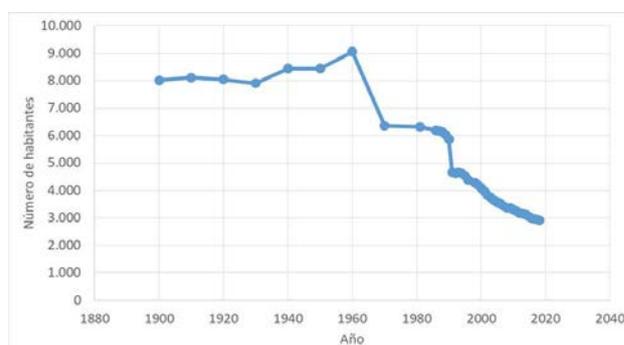


Fig 8. Evolución de la población en el Concello de Viana do Bolo, donde se observa el continuo descenso de los habitantes desde el cierre de la mina en los años 80 (datos tomados del Instituto Nacional de Estadística, <https://www.ine.es/>).

La puesta en marcha del proyecto de la mina de Penouta está contribuyendo a paliar este declive con la creación actualmente de 70 puestos de trabajo directos, el 80% de los cuales provienen de la región. Además, alrededor de 30 personas trabajan en la mina bajo empresas subcontratadas, como movimiento de tierras, laboratorio de análisis químico, servicio de comidas, sistema de vigilancia y servicios de limpieza. En general, en los proyectos mineros cada trabajo directo genera tres empleos indirectos. Se espera, por tanto, que el proyecto minero de Penouta mejore la economía del lugar a corto y medio plazo.

SMS entiende que, al ser un sector específico y priorizar la contratación local, la capacitación de todos los trabajadores es esencial, también como un apoyo fundamental para lograr que la influencia de la mejora económica del proyecto de la mina Penouta pueda ser visible incluso después del cierre de la mina. Así, el proyecto de la mina Penouta está mejorando continuamente la capacitación de los trabajadores en el área, mediante un plan de capacitación previo a la contratación para llevar a cabo el trabajo. Estos planes de capacitación incluyen aspectos de seguridad y medioambientales, que son fundamentales para cumplir con los objetivos generales de Responsabilidad Social Corporativa de la empresa.

Nuevas demandas emergentes

Más de la mitad de la producción de Ta mundial proviene de la zona centroafricana, principalmente de la región de los Grandes Lagos, que incluye la República Democrática del Congo, Ruanda y Burundi. Sin embargo, se ha observado una desaceleración progresiva en el suministro de esta área desde la implementación de las políticas de libre conflicto, una disminución que se espera que continúe en las previsiones hasta 2020 (Roskill, 2016). Esta disminución se complementa, además, con el aumento en el suministro de Ta procedente de las minas de América del Sur, como Pitinga (que también suministra Nb), o Australia, debido al resurgimiento de la minería de litio, donde se obtiene el Ta como un subproducto.

Con la excepción de pequeñas cantidades de tantalita que se obtienen como subproducto de una explotación de caolín en Francia, actualmente no hay producción de origen primario en la UE. La UE no importa grandes cantidades de concentrados de Ta, siendo más importantes la importación de productos químicos (óxidos, sales y aleaciones) y productos finales procesados (European Commission, 2017).

Las propiedades excepcionales de Ta y Nb han dado lugar a una alta demanda de dichos metales para aplicaciones altamente especializadas (Fig. 9 y 10), por lo que se espera que haya un crecimiento de la demanda de 4-5% por año (Roskill, 2016).

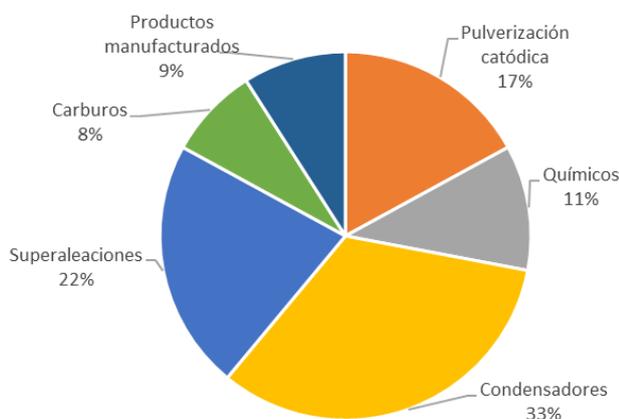


Fig. 9. Aplicaciones principales del tantalio (Roskill, 2016; European Commission, 2017).

Los condensadores son, y se espera que sigan siendo, la principal aplicación del Ta (Fig. 9), pero la creciente funcionalidad de los teléfonos inteligentes y las continuas reducciones en el tamaño de los condensadores son las principales limitaciones al crecimiento en su consumo debido a la disminución del contenido de Ta requerido para su fabricación.

La extraordinaria resistencia del Ta y Nb a las altas temperaturas y a la corrosión los hace adecuados para su uso en una serie de aplicaciones para aleaciones, sector que probablemente tenga una tasa de crecimiento

superior a la media, principalmente debido a una buena perspectiva para el sector aeroespacial.

En el acero, el Nb se utiliza como ferroniobio, principalmente en la producción de aceros de alta resistencia y baja aleación para las industrias de construcción, automotriz y oleoductos (Jordens *et al.*, 2013), lo que supone un incremento anual en la demanda de este metal del 8% (European Commission, 2017). También se usa en ciertos tipos de aceros inoxidables y resistentes al calor (Fig. 10), lo que aumenta significativamente la resistencia y reduce sustancialmente los costes. Esta puede ser la base para el aumento del uso de Nb, proporcionando así un área de crecimiento potencial en la demanda de este metal.

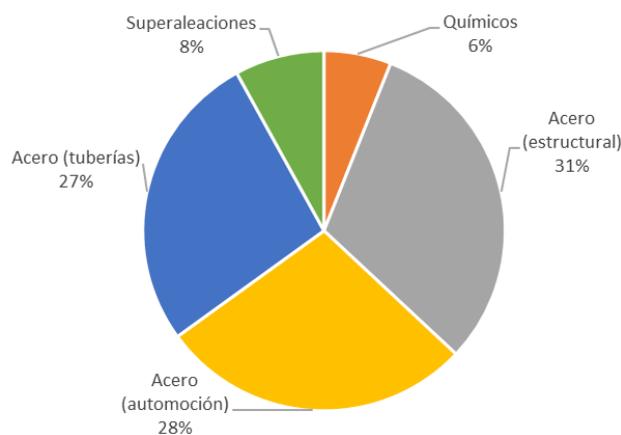


Fig. 10. Aplicaciones principales del niobio (European Commission, 2017).

La pulverización catódica, los productos químicos de Ta y Nb y los productos manufacturados (placas, láminas, bobinas, alambres...) tienen una amplia gama de aplicaciones finales. Por lo tanto, también se espera que la demanda en estos segmentos muestre un crecimiento superior al promedio.

Por el contrario, el uso de Ta en la fabricación de carburos, que se utilizan casi exclusivamente en cementos de carburo para herramientas de corte, se prevé que disminuya lentamente en los próximos años, disminuyendo en un 1% por año.

Se han hecho intentos para reemplazar el uso de Ta por Nb, o incluso por Al, en los condensadores, pero el tamaño de estos es mayor, o también por condensadores cerámicos, pero la resistencia es menor. En el uso de herramientas de corte, los precios de otros metales refractarios que podrían reemplazar al Ta son similares, por lo que no parece rentable. En cuanto a las aleaciones, el Ta desempeña un papel importante a un coste relativamente bajo, por lo que se considera no reemplazable. Es evidente, por lo tanto, que este escenario también favorece la creciente demanda de este metal para los próximos años, así como el mantenimiento de los precios del mercado. El Ta ha sido históricamente susceptible a cambios rápidos en el equilibrio del mercado con movimientos

volátiles de precios, especialmente relacionados con la minería y el stock acumulado. Por el contrario, los precios del Nb son históricamente muy estables y parecen mantenerse en un aumento constante.

Considerando este escenario de mayor demanda y precios más o menos estables o al alza de los metales, la reapertura de la mina Penouta para la revalorización de residuos mineros supone la única explotación de estos metales estratégicos en toda Europa. Aunque esto no cubre toda la demanda europea, garantiza una importante cuota de mercado para el producto español.

Nicho creciente en el campo de la I + D + i

Hasta ahora, en la planta de proceso de la mina Penouta, se obtenía un concentrado mixto de Sn-Ta-Nb que se vendía a fundiciones y refinерías internacionales, las cuales realizaban la separación del Sn y del Ta y Nb. El proceso de concentración gravimétrica de la mina de Penouta ha sido probado y estudiado en detalle no solo por el personal de la empresa, sino también en colaboración con el consorcio europeo a cargo del proyecto H2020 OptimOre (e.g., Ghorbani *et al.*, 2017), de cuyo Comité Asesor formaba parte SMS.

Uno de los objetivos principales de SMS es desarrollar tecnologías innovadoras para la recuperación de estos metales mediante una combinación de separación electrostática y magnética de alta intensidad junto con técnicas de pirometalurgia e hidrometalurgia (López *et al.*, 2018), obteniendo así un producto con mayor valor añadido (Fig. 11). La obtención de estos productos dentro de la UE tendría un alto interés científico-técnico, así como económico y ambiental, al revalorizar unos residuos mineros abandonados, maximizando el beneficio económico obtenido de estos materiales complejos, al tiempo que minimiza el problema del suministro europeo de materias primas críticas

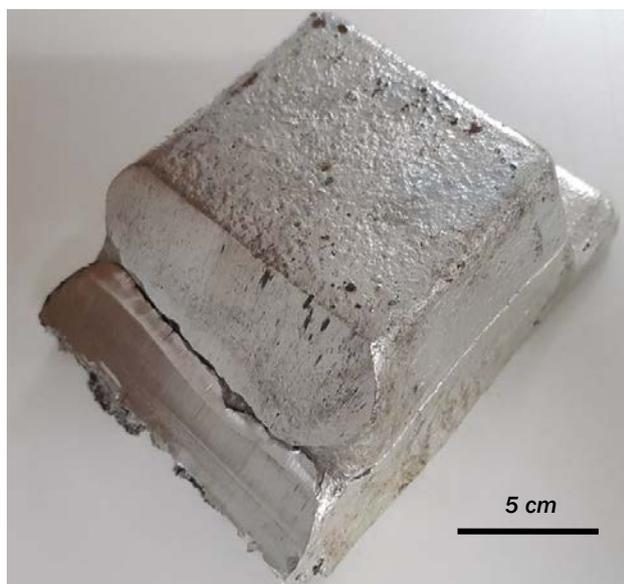


Fig 11. Fragmento de lingote de estaño.

La incorporación de técnicas de separación magnética de alta intensidad está permitiendo actualmente la separación del concentrado mixto de Sn-Ta-Nb, obteniendo concentrados separados de casiterita y de columbita-tantalita. Actualmente, SMS está investigando la implementación de técnicas de separación electrostática, así como los procesos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos que permitirían mejorar aún más los productos finales, aportándoles mayor valor añadido y eliminando intermediarios en su procesamiento.

En los últimos años, los procesos pirometalúrgicos han sido reemplazados casi por completo por los hidrometalúrgicos para la recuperación de Ta y Nb. La forma más común de extraer estos metales a partir de concentrados minerales es mediante el uso de disolventes, donde estos concentrados son atacados con una mezcla de ácido fluorhídrico y ácido sulfúrico a altas temperaturas, disolviendo Ta y Nb para formar complejos fluorados (Satish Kumar *et al.*, 2013), lo que implica un alto consumo de energía solo para la extracción con disolventes (Nuss y Eckelman, 2014; Koltun y Tharumarajah, 2014).

Las líneas de investigación actuales en este campo se centran en la sustitución de los fundentes actuales en el proceso pirometalúrgico por otros que producen sales de Nb y Ta mucho más solubles. Esto podría permitir el reemplazamiento del ácido fluorhídrico por ácidos orgánicos, menos peligrosos, más respetuosos desde el punto de vista ambiental y quizás mucho más efectivos (Sánchez-Segado *et al.*, 2017). Por lo tanto, el objetivo es implementar nuevas soluciones que harán que el proceso hidrometalúrgico de recuperación de Nb y Ta sea más innovador y competitivo. Este es el principal objetivo que persiguen los diversos proyectos de I+D+i en los que SMS participa actualmente, tanto a nivel nacional como europeos.

Por lo tanto, la inversión en I+D+i en este campo respondería a una demanda social importante y tiene un gran interés, principalmente desde el punto de vista socio-económico y científico-técnico, permitiendo el desarrollo de la tecnología necesaria para la recuperación de Ta, Nb y Sn de minerales complejos, lo que satisface las demandas de la industria europea y la tecnología para estos materiales, en diferentes sectores industriales.

Gran aceptación ambiental y social

El hecho de que la mina de Penouta haya sido un área degradada después del cierre de los trabajos mineros, donde no se ha desarrollado ningún proceso de restauración ambiental en los últimos 30 años, ha facilitado el estudio del impacto ambiental, ya que muchos de los impactos ya estaban presentes en el área antes incluso de la realización de cualquier actividad industrial. Los impactos ambientales positivos son mayores que en otros proyectos de apertura de minas en áreas naturales, ya que después del proceso industrial la

restauración mejorará la calidad ecológica del punto de partida. Esto ha facilitado el proceso administrativo para la autorización legal del proyecto.

La existencia de instalaciones antiguas, tales como pozos mineros, conexiones de agua y el antiguo frente de explotación, actualmente inundado, ha facilitado la autorización de captación de agua y la autorización de vertido.

En general, el proyecto de la mina de Penouta ha tenido una buena aceptación ambiental y social para su autorización y puesta en marcha. Los trabajos mineros que existían anteriormente han favorecido la aceptación del entorno local para la reapertura de la mina, ya que hoy en día los terrenos locales sin ningún uso productivo se están revalorizando para la minería, lo que genera riqueza y empleos para la aldea de Penouta, así como la mejora de la economía de la zona. Estos son impactos positivos que permanecen aún hoy en la memoria de los habitantes, cuando la mina funcionaba hace décadas, convirtiéndose hoy en día en un punto positivo para la obtención de las licencias locales.

Contribución a la mejora del sector de las materias primas

La Unión Europea se enfrenta a dos desafíos principales, que son cruciales para desarrollar una sólida base industrial como componente esencial del crecimiento y la competitividad en el marco de la Unión. Por un lado, la alta dependencia exterior de las importaciones de estas materias primas. Por otro lado, garantizar la seguridad del suministro, que se encuentra amenazado debido al rápido aumento de la demanda.

Teniendo en cuenta la escasez de depósitos primarios con Ta y Nb en España (y en Europa en general), una fuente alternativa de estos metales estratégicos, especialmente en España, donde existe una larga tradición en la extracción de Sn, es la recuperación de antiguos residuos mineros donde Nb y Ta están asociados en forma de columbita-tantalita, junto con la casiterita. La existencia de estas fuentes secundarias de Nb y Ta, únicas en el mundo, las hace enormemente atractivas, tanto desde el punto de vista académico y tecnológico (es necesario desarrollar el conocimiento para abordar su recuperación), como económico, derivado de su explotación, ya que se trata de metales que tienen un elevado valor económico en el mercado, especialmente el Ta.

CONCLUSIONES

A modo de resumen, se puede decir que el proyecto Penouta puede considerarse un excelente ejemplo de proyecto minero sostenible, en el cual los residuos abandonados son revalorizados para generar beneficios económicos, ambientales y sociales en el marco de la

economía circular, basándose en los siguientes puntos fuertes:

- La valorización de los residuos mineros de la mina de Penouta, lo que provoca la reducción de la presencia de residuos en balsas y escombreras, donde no se realizó ningún proceso de restauración después del cierre.
- El beneficio de los residuos mineros abandonados para la valorización y obtención de metales estratégicos, como el Ta y el Nb (materias primas críticas para la UE), así como el Sn y los minerales industriales.
- Reducción de estos antiguos residuos mineros hasta en un 80%, tras el aprovechamiento de los minerales metálicos y no metálicos, lo que favorecerá la recuperación ambiental del área tras las tareas de restauración.
- Explotación minera en un área ya degradada ambientalmente. Una vez finalizada la explotación por SMS, se aplicarán técnicas de restauración ambiental. La calidad ecológica mejorará con respecto al estado actual y ofrecerá usos hoy día inexistentes. Un gran desafío para el proyecto consiste en alcanzar un grado de calidad que permita que el área se incluya en el espacio protegido Red Natura 2000.
- Obtención de metales estratégicos a partir de residuos mineros en una zona libre de conflicto.
- El diseño de una moderna planta minera que permita el uso eficiente de los recursos energéticos e hídricos. En este proceso, se evita el uso de sustancias químicas porque es un proceso exclusivamente gravimétrico.
- Mejora de la economía del lugar en un área de economía rural en continua decadencia. Actualmente, se han creado más de 70 empleos directos, siendo el 80% de las personas contratadas residentes en el entorno cercano.
- Mejora de la capacitación de los trabajadores en el área.
- Desarrollo de proyectos de I+D+i para mejorar la eficiencia y eficacia del proceso, la calidad de los productos, las ventas, el control ambiental y la actividad de restauración.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro más sincero agradecimiento a todo el Comité Organizador de la XXXVIII Reunión Científica de la Sociedad Española de Mineralogía, por su invitación para participar en esta reunión, así como a todos los compañeros, amigos y profesionales que han puesto su granito de arena para que este proyecto hoy día sea una realidad.

REFERENCIAS

- ADARO (1982): Proyecto de investigación de la mina de Penouta. Cálculo de reservas para leyes de corte de 800 y 600 g/t. Informe interno (no publicado). Madrid, 69 p.
- (1985): Investigación minera del yacimiento de Penouta. Informe interno (no publicado). Madrid, 9 volúmenes.
- Alfonso, P., Hamid, S.A., Garcia-Valles, M., Llorens, T., Moro, F.L., Tomasa, O., Calvo, D., Parcerisa, D. (2018): Textural and mineral-chemistry constraints on columbite-group minerals in the Penouta deposit: evidence from magmatic and fluid-related processes. *Mineral. Mag.*, **82** (S1), S199-S222. <https://doi.org/10.1180/minmag.2017.081.107>.
- Blengini, G.A., Mathieux, F., Mancini, L., Nyberg, M., Viegas, H.M. (Editors), Salminen, J., Garbarino, E., Orveillon, G., Saveyn, H., Mateos Aquilino, V., Llorens González, T., García Polonio, F., Horckmans, L., D'Hugues, P., Balomenos, E., Dino, G., de la Feld, M., Mádaí, F., Földessy, J., Mucsi, G., Gombkötő, I., Calleja, I. (2019): Recovery of critical and other raw materials from mining waste and landfills: State of play on existing practices. EUR 29744 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. 125 p. ISBN 978-92-76-03391-2. <https://doi.org/10.2760/494020>, JRC116131. <http://aclima.eus/wp-content/uploads/2019/06/Recovery-of-critical-and-other-raw-materials-from-mining-waste-and-landfills.pdf> [consulta: 15 abril 2019].
- Diez Montes, A., Martínez Catalán, J.R., Bellido Mulas, F., (2010): Role of the Ollo de Sapo massive felsic volcanism of NW Iberia in the Early Ordovician dynamics of northern Gondwana. *Gondwana Res.*, **17**, 363–376. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2009.09.001>.
- European Commission (2017): Study on the review of the list of Critical Raw Materials. Critical Raw Materials Factsheets. Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Raw Materials. Publications Office of the European Union, Luxembourg. 515 p. ISBN: 978-92-79-72119-9. <https://doi.org/10.2873/398823>. <https://op.europa.eu/es/publication-detail/-/publication/7345e3e8-98fc-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en/format-RDF> [consulta: 15 abril 2019].
- Ghorbani, Y., Fitzpatrick, R., Kinchington, M., Rollinson, G., Hegarty, P. (2017): A process mineralogy approach to gravity concentration of tantalum bearing minerals. *Minerals*, **7** (10), 194. <https://doi.org/10.3390/min7100194>.
- Jordens, A., Cheng, Y., Waters, K. (2013): A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. *Miner. Eng.*, **41**, 97-114. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.10.017>.
- Koltun, P. & Tharumarajah, A. (2014): Life cycle impact of rare earth elements. *ISRN Metallurgy*. Article ID 907536. 10 pp. <https://doi.org/10.1155/2014/907536>.
- López, F.A., García-Díaz, I., Rodríguez Largo, O., García Polonio, F., Llorens, T. (2018): Recovery and purification of tin from tailings from the Penouta Sn-Ta-Nb deposit. *Minerals*, **8** (1), 20. <https://doi.org/10.3390/min8010020>.
- López-Moro, F.J., García Polonio, F., Llorens González, T., Sanz Contreras, J.L., Fernández Fernández, A., Moro Benito, M.C. (2017): Ta and Sn concentration by muscovite fractionation and degassing in a lens-like granite body: The case study of the Penouta rare-metal albite granite (NW Spain). *Ore Geol. Rev.*, **82**, 10–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.11.027>.
- Llorens González, T., García Polonio, F., López Moro, F.J., Fernández Fernández, A., Sanz Contreras, J.L., Moro Benito, M.C. (2017): Tin-tantalum-niobium mineralization in the Penouta deposit (NW Spain): Textural features and mineral chemistry to unravel the genesis and evolution of cassiterite and columbite group minerals in a peraluminous system. *Ore Geol. Rev.*, **81**, 79–95. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.034>.
- Montero, P., Talavera, C., Bea, F., Lodeiro, F.G., Whitehouse, M.J. (2009): Zircon geochronology of the Ollo de Sapo Formation and the age of the Cambro-Ordovician rifting in Iberia. *J. Geol.*, **117**, 174–191. <https://doi.org/10.1086/595017>.
- Nuss, P. & Eckelman, M.J. (2014): Life cycle assessment of metals: a scientific synthesis. *PLoS ONE*, **9** (7), e101298. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101298>.
- Roskill (2016): Tantalum: global industry, markets & outlook to 2020. Twelfth Edition. Roskill Information Services Ltd. 148 pp. ISBN 978 1 910922 12 5.
- Sanchez-Segado, S., Monti, T., Katrib, J., Kingman, S., Dodds, C., Jha, A. (2017): Towards sustainable processing of columbite group minerals: Elucidating the relation between dielectric properties and physico-chemical transformations in the mineral phase. *Scientific Reports*, **7**. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18272-3>.
- Satish Kumar, T., Rajesh Kumar, S., Lakshmi pathi Rao, M., Prakash, T. L. (2013): Preparation of niobium metal powder by two stage magnesium vapor reduction of niobium pentoxide. *Journal of Metallurgy*, **6** p. Article ID 629341. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/629341>.
- Strategic Minerals Spain (2016): Estado ambiental cero de la mina de Penouta. Informe interno no publicado. 121 p.

Depósitos de litio de la península ibérica: la geología como base de su exploración

Encarnación Roda Robles (1*), Romeu Vieira (2), Pedro Pablo Gil Crespo (1)

(1) Departamento de Geología. Universidad del País Vasco (UPV/EHU), Campus de Bizkaia, Barrio Sarriena s/n, 48940, Leioa, Bizkaia (España)

(2) Instituto de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 4169-007, Porto (Portugal)

* corresponding author: encar.roda@ehu.es

Abstract:

Lithium has become a strategic element due to its high demand in the renewable energy sector, thanks to its use for the manufacture of rechargeable Li-ion batteries. As a result, its price has increased exponentially in recent years, which in turn has driven the intensification of exploration campaigns in search of deposits of this metal. The highest mineral resources of lithium on a global scale are associated with brines, followed by pegmatitic deposits. In the western zone of the Iberian Peninsula important lithium concentrations appear. They are mainly associated with aplopegmatitic rocks that occur in groups of tabular bodies up to a few meters of thickness and a few hundred meters in length, with Li_2O concentrations of up to 1% in weight. These bodies, of Variscan age, are considered related to the fractionation of S-type peraluminous granites, poor in Ca and rich in P. Their exploration is developed mainly from cartographic and geochemical (stream sediments, soils and rock) techniques, as well as by studying certain mineralogical/textural features.

Resumen:

El litio se ha convertido en un elemento estratégico dada su alta demanda dentro del sector de las energías renovables, gracias a su uso para la fabricación de baterías recargables de ion-Li. Como consecuencia su precio se ha incrementado de forma exponencial en los últimos años, lo que a su vez ha impulsado la intensificación de campañas de exploración en busca de depósitos de este metal. Los mayores recursos de litio a escala mundial se asocian a salmueras, seguidas de los depósitos de tipo pegmatítico. En la zona oeste de la península ibérica aparecen importantes concentraciones de litio, principalmente asociadas a rocas aplopegmatíticas que se presentan en grupos de cuerpos tabulares de hasta varios metros de potencia y unos cientos de metros de longitud, con concentraciones de Li_2O de hasta el 1% en peso. Estos cuerpos, de edad varisca, se consideran asociados al fraccionamiento de granitos peraluminicos de tipo S, pobres en Ca y ricos en P. Su prospección se desarrolla principalmente a partir de técnicas cartográficas y geoquímicas (sedimentos de arroyo, suelos y roca), así como valiéndose de determinadas características mineralógicas y texturales.

Palabras Clave: Litio, Mercado, Mineralizaciones, Exploración, Península Ibérica. | **Key Words:** Lithium, Market, Mineralization, Exploration, Iberian Peninsula.

INTRODUCCIÓN

La conocida como “huella verde” está marcando en la actualidad los pasos a seguir en la industria. El aumento de las emisiones globales de carbono, junto con la polución de las ciudades más importantes del planeta, han propiciado una concienciación ecológica en la sociedad que en tiempos de la cumbre climática de Kyoto en 1992 parecía más preocupada por cuestiones políticas que medioambientales. La Conferencia de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 2015 (COP21) tuvo lugar en París bajo un minucioso escrutinio debido al escándalo de Volkswagen y a los episodios de “niebla tóxica” (“smog events”) en China. Si bien EEUU ha sido el mayor foco de emisión de carbono desde que se firmó el acuerdo sobre las emisiones de dióxido de carbono en Kyoto, China, con su reciente crecimiento, se ha sumado al país americano

en el último periodo. En la cumbre de París de 2015 países de todo el mundo se han comprometido a reducir sus emisiones de carbono con objeto de mantener el aumento de temperatura media global por debajo de 2.7° . Según el informe de Goldman Sachs (2015), el modo de lograrlo es, más que la cuestión política del “calentamiento global”, apostar por la implementación de la Tecnología de Bajo Carbono. En la portada de este informe se puede leer: “Exploramos la economía baja en carbono, que ahora es una oportunidad de ingresos creciente de 600 mil millones anuales (\$). Entre 2015 y 2020, la energía solar fotovoltaica y la energía eólica en tierra agregarán más al suministro global de energía que la producción de petróleo de esquisto de EEUU entre 2010 y 2015. Para 2020, seis de cada diez bombillas serán LED, y nuestros analistas esperan que los fabricantes de automóviles vendan 25 millones de vehículos híbridos y eléctricos para 2025, 10 veces más que hoy. Estimamos

que estas tecnologías ahorrarán más de 5 Gt de emisiones de CO₂ por año para el año 2025 y podrían ayudar a que las emisiones globales no alcancen su nivel máximo antes de lo esperado alrededor de 2020, con efectos apreciables a nivel global”.

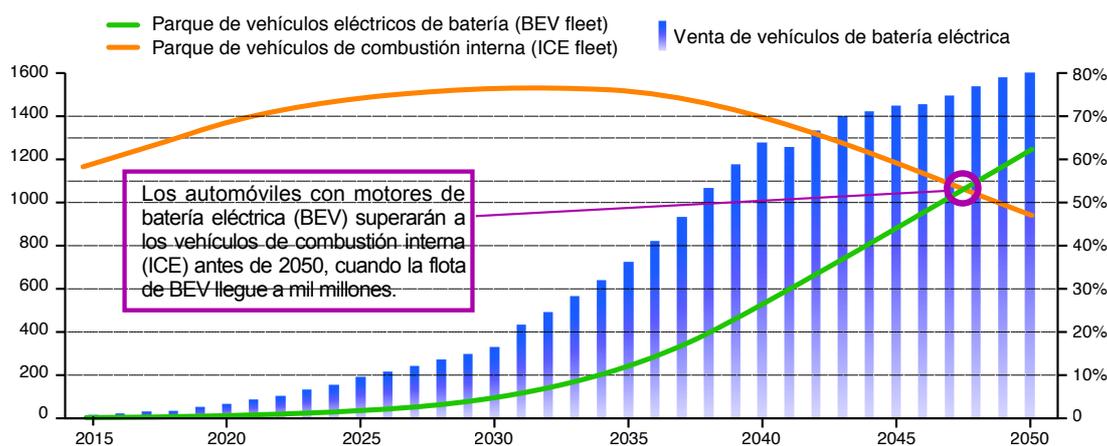
Dos de estas grandes piezas de la economía baja en carbono son los vehículos híbridos/eléctricos y el almacenamiento de energía. Presionados por la creciente concienciación medioambiental de la sociedad, los subsidios ecológicos por parte de los gobiernos, y los recientes escándalos de contaminación de automóviles, los mayores fabricantes de vehículos del mundo están cambiando su enfoque de mercado. Después de los problemas de niebla tóxica en China, país que constituye un mercado muy atractivo para los fabricantes de automóviles, su gobierno aspira a disponer de 5 millones de vehículos eléctricos en sus carreteras a finales de 2020 (Bloomberg, 2016). Por otro lado, algunas de las compañías automotrices más grandes, localizadas en Europa (p. ej. Mercedes, BMW, Renault, Volvo, Audi, VW) cuentan con más de 20 modelos híbridos o

completamente eléctricos que van a salir a la venta. Los fabricantes de baterías se concentran principalmente en China (134.5 GWh), Asia (excluyendo China) (45.5GWh), y EE. UU. (20.9GWh); pero Europa ya cuenta con una capacidad total de 19.6 GWh (Visual Capitalist, 2018). Las políticas de la UE y la Asociación EUROBAT conducirán a un crecimiento proyectado en la capacidad de fabricación de baterías en Europa que pasará de 19.6 GWh en 2018, a 93.5GWh en 2023 y a 207 GWh en una década (Visual Capitalist, 2018).

La industria se está preparando para la siguiente fase de demanda de baterías de iones de litio prevista en el mercado. El mercado de vehículos eléctricos, un segmento que se ubica en 1-2% de las ventas totales de vehículos en la actualidad, está creciendo y se espera que en 2022 alcance el 5% de las ventas mundiales de vehículos, el 10% en 2023 y antes de 2050 se cree que superará el número de vehículos con motor de combustión interna (Fig. 1) (Raconteur, 2018). Impulsadas por la "huella de energía cero", las restricciones de suministro, y el aumento de precios de

Carrera por la venta de vehículos eléctricos a batería

Flota global de vehículos de pasajeros (millones)



Los automóviles con motores de batería eléctrica (BEV) superarán a los vehículos de combustión interna (ICE) antes de 2050, cuando la flota de BEV llegue a mil millones.

Fig 1. Evolución del número de vehículos de combustión y eléctricos y datos de venta de baterías para estos últimos (modificado de Raconteur, 2018).

las energías fósiles, se han desarrollado nuevas tecnologías, tanto para la fabricación de baterías de litio, como para la recuperación de litio a partir de depósitos minerales. Gracias a ello se puede llevar a cabo una extracción y producción de litio a un menor coste, principalmente a partir de los recursos “olvidados” de los depósitos de litio de “roca dura”. Hasta la década de 1990, los minerales espodumena y petalita eran las principales fuentes de litio. Sin embargo, el menor coste de explotación de los depósitos de salmueras de litio ha propiciado un aumento de la producción de litio procedente de estos depósitos. Actualmente, después de asegurar los mejores activos en sus propios países, las compañías de exploración de litio, principalmente con sede en Canadá y Australia, están estableciendo nuevos objetivos, y la península ibérica, localizada en el eje entre Europa y África, se ha convertido en un objetivo

destacado para explorar depósitos de litio en “roca dura”.

Usos del litio

El litio se utiliza desde hace muchos años en una variedad de productos industriales, principalmente en la industria cerámica, vidrio, producción de aluminio y lubricantes, entre otros. Este sigue siendo precisamente el caso de la península ibérica, donde la mayoría de los depósitos de litio se extraen y procesan para la industria cerámica, no solo para España y Portugal, sino también con grandes tasas de exportación de esta materia prima. En la actualidad, impulsadas por la “economía verde”, y con la creciente comercialización del ion-Li, las baterías son la principal fuente de demanda de este metal, constituyendo un 56% de su mercado (Fig. 2) (Statista, 2018).

Usos de Li (2018)

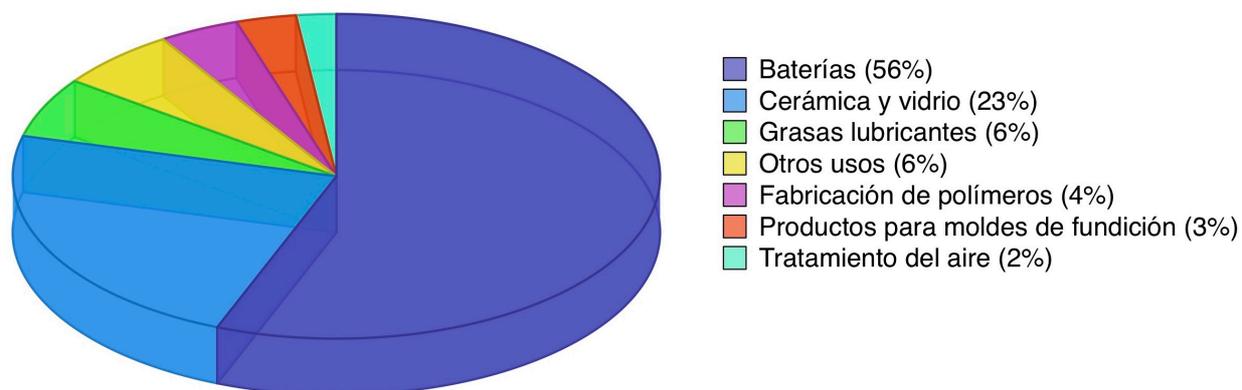


Fig 2. Distribución de los principales usos del litio. Datos de Statista (2018).

Según estimaciones del Deutsche Bank (2016), en el año 2025 el mercado de baterías de litio será más de 2 veces mayor que el mercado total de litio actual, con más del 70% destinado a vehículos eléctricos, bicicletas eléctricas, baterías tradicionales y almacenamiento de energía.

Producción de litio

El carbonato de litio (Li_2CO_3) y el hidróxido de litio (LiOH) son los dos productos principales que marcan los precios de los mercados. El carbonato de litio es el primer producto químico en la cadena de producción y por ello se vende por un valor menor que el hidróxido de litio. Puede ser utilizado como material de cátodo en

algunas baterías. El hidróxido de litio es normalmente un subproducto del carbonato de litio, creado por una reacción de metátesis con hidróxido de calcio. Puede usarse para producir material de cátodo de manera más eficiente y, de hecho, es necesario para algunos tipos de cátodos.

La mayor producción se encuentra en Australia, con 51.0kt, procedentes de las pegmatitas (principalmente espodumena) de la mina Greenbushes de Albermale y Tianqui, seguida por material extraído de las salmueras en los salares de Chile y Argentina, con 16.0kt y 6.2kt respectivamente (Fig. 3) (USGS, 2019).

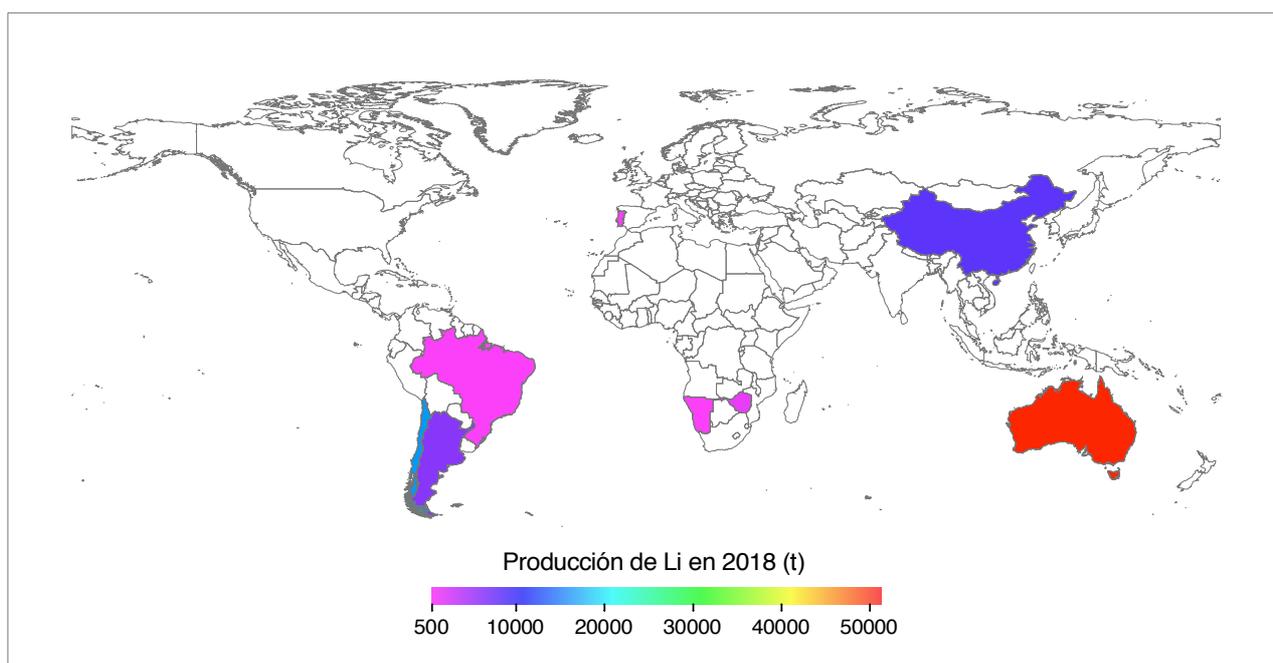


Fig 3. Producción de litio por países en el año 2018. Datos tomados de USGS (2019).

Coste y precios del litio

La industria del litio experimentó un aumento espectacular de los precios en 2016, seguido de un periodo con altibajos. Benchmark Minerals (2018) informó de que, en China, el mayor consumidor mundial de este metal, los precios del carbonato de litio de grado

de batería cayeron a 13.000 US\$/tonelada en agosto de 2016 desde un máximo de 24.750 US\$/tonelada en marzo de ese mismo año, con una meseta alrededor de 16.000 US\$/tonelada a finales de 2018, no muy lejos de las predicciones del Deutsche Bank (2016) reflejadas en la Fig. 4.

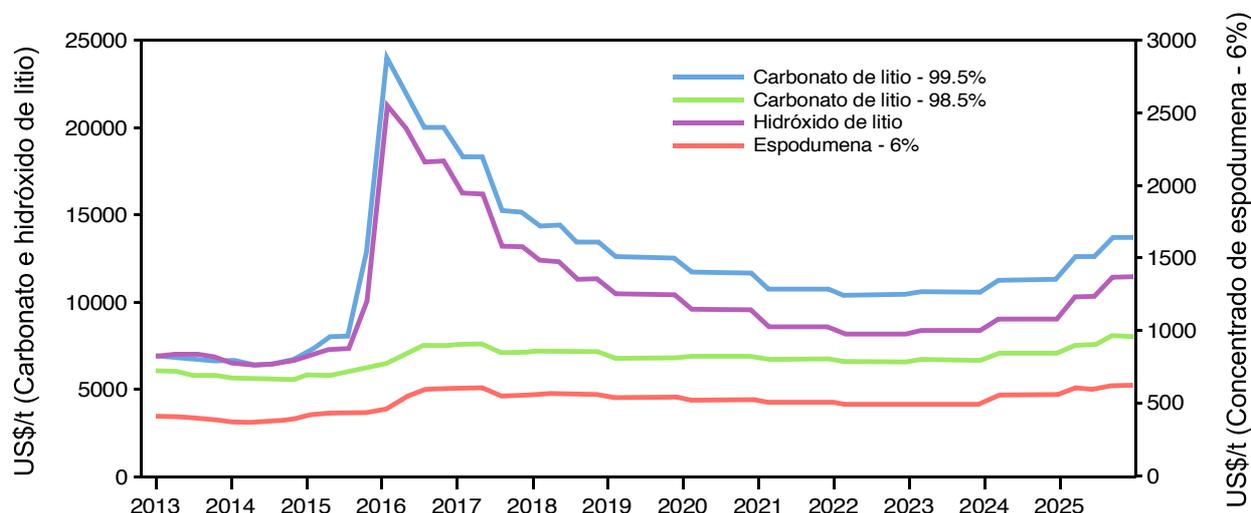


Fig 4. Previsión de la evolución de los precios del litio desde 2013 y del mercado, hasta 2025, del carbonato de litio (99.5% y 98.5%), del hidróxido de litio -en el eje de ordenadas izquierdo- y del concentrado de espodumena (6%) -en el eje de ordenadas derecho- (modificado de Deutsche Bank, 2016).

El coste de producción de carbonato de litio a partir de fuentes de Li de “roca dura” es de aproximadamente 6.000 US\$/t LCE (lithium carbonate equivalent) (4.000 – 10.000 US\$), siendo el precio de la materia prima (concentrados de espodumena 6% de 700US\$/t) el principal componente de coste. La producción de carbonato de litio a partir de salmueras cuesta alrededor de 4.000 US\$/t LCE (Roskill, 2019). Es precisamente el coste de la materia prima lo que hace que el coste de las fuentes de litio de “roca dura” sea menos competitivo que la producción de litio a partir de salmueras (Deutsche Bank, 2016), según se deduce de la Tabla 1.

Demanda global de litio

La demanda global de litio fue de 184kt LCE en 2015, alcanzando los 214kt LCE en 2017 (Azevedo *et al.*, 2018). El mercado de baterías, especialmente para vehículos eléctricos y almacenamiento de energía, está creciendo anualmente. En todo el mundo hay planes para aumentar las capacidades de fabricación de baterías de 220,5GWh actuales a 1.102GWh para 2028, lo que elevará la demanda a más de 500kt LCE en varios pronósticos de demanda para 2025 (por ejemplo, Deutsche Bank, 2016; Azevedo *et al.*, 2018) (Fig. 5).

Tabla1. Costes de producción del carbonato de litio a partir de espodumena. Datos de Deutsche Bank (2016).

	Unidades	Precio unitario	US\$/t LCE
<i>Espodumena</i>	8t	US\$ 460/t	3680
<i>Carbonato de sodio</i>	1.6t	US\$ 219/t	350
<i>Acido sulfúrico</i>	2.4t	US\$ 50/t	120
<i>Otros</i>			71
<i>Materiales</i>			4221
<i>Electricidad</i>	2400 KW/h	US\$ 0.09/KW/h	207
<i>Carbón</i>	3t	US\$ 24/t	72
<i>Costes laborales</i>			175
<i>Otros</i>			566
<i>Otros costes</i>			1020
<i>Total costes</i>			5241
<i>Costes de transformación (excluyendo espodumena)</i>			1561

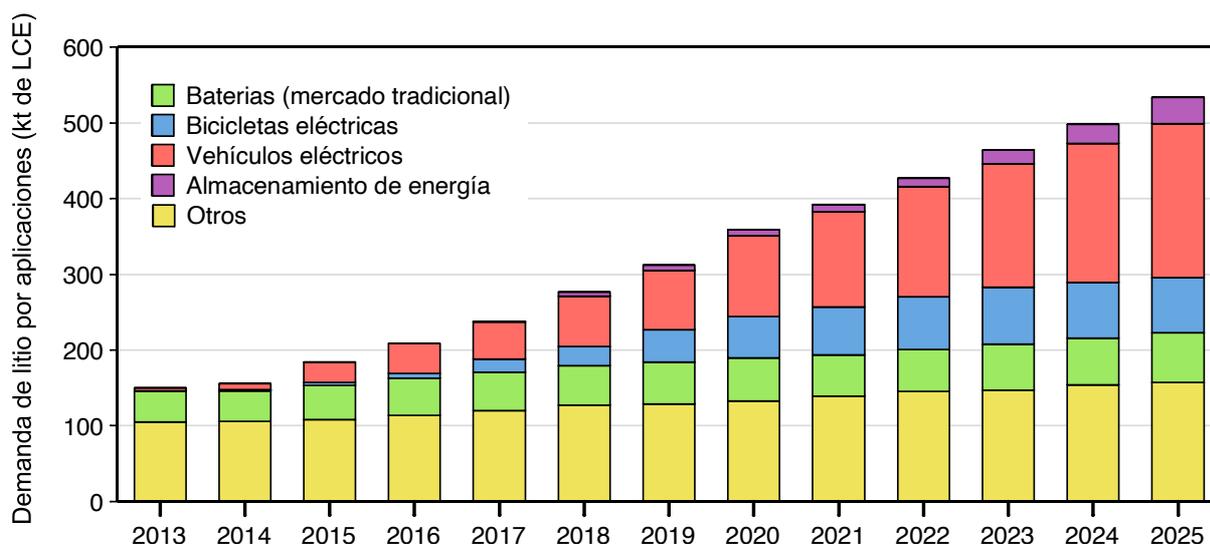


Fig 5. Datos de la evolución de la demanda de LCE desde el año 2013 hasta el año 2015 y previsión hasta 2025. Modificado de Deutsche Bank (2016).

Prospección de depósitos de litio

Según el USGS (2019), los recursos de litio han aumentado sustancialmente en todo el mundo debido a la prospección continua, y suman más de 53 millones de toneladas de contenido de este metal. En el año 2015, 31 empresas exploraban en busca de litio. En solo dos años,

ese número se ha incrementado hasta 136. La cantidad total invertida en la prospección de litio aumentó de 36.200.000 US\$ en 2015 a 156.500.000 US\$ en 2017. En 2018, la exploración de litio alcanzó un nuevo máximo de 247.100.000 US\$ (S&P Global Market Intelligence, 2019). En la figura 6 se detallan las inversiones realizadas por países.

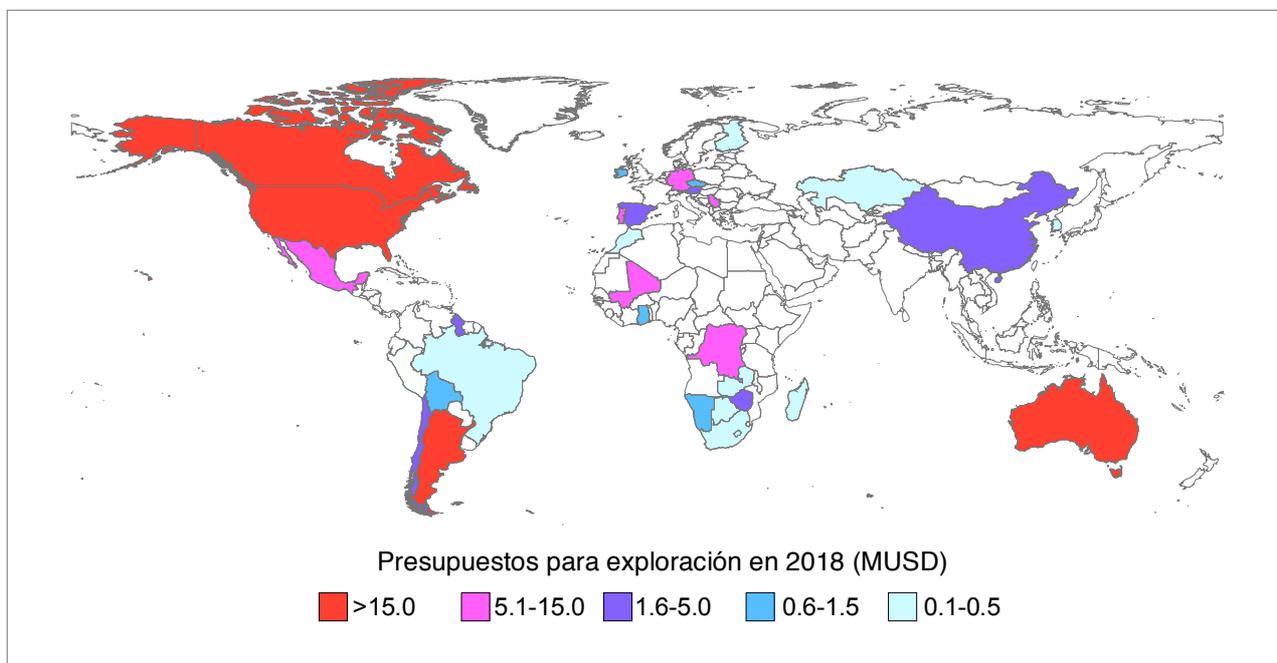


Fig 6. Inversiones efectuadas en la exploración de litio por países en el año 2018, en millones de dólares estadounidenses (MUSD). Datos tomados de S&P Global Market Intelligence (2019).

Los proyectos de exploración en la península ibérica, Alberta I y Valdeflores en España, y Sepeda, Mina do Barroso, y Mina de Alvarrões en Portugal, han definido y

reportado (de acuerdo con los códigos JORC y NI43-101) recursos de litio (incluidos los recursos inferidos) de 161Mt al 1% Li₂O.

DEPÓSITOS DE LITIO: TIPOLOGÍA

El litio es un elemento relativamente abundante en la naturaleza, con una concentración media de 16 ppm (en peso) en la corteza terrestre (Rudnick y Gao, 2003). Los depósitos de litio más importantes aparecen en forma de sales en salmueras y evaporitas asociadas, por lo general, a regiones continentales áridas. También son importantes las concentraciones de este elemento que se dan en rocas de tipo pegmatítico y, en menor medida, en depósitos hidrotermales de origen ígneo y en su roca encajante metasomatizada. Menos abundantes son los depósitos de arcillas ricas en litio, normalmente producto de la alteración hidrotermal de rocas volcánicas. A continuación se describen las características más significativas de los tipos de depósitos de litio más comunes.

Salmueras y evaporitas de Li

Las evaporitas se pueden definir como un sedimento mineral soluble en agua (i.e., sedimento químico) que resulta de la precipitación y cristalización a partir de salmueras por evaporación solar. Existen evaporitas de origen marino (a partir de aguas oceánicas) y evaporitas no marinas, de origen continental, asociadas a ambiente lacustre. En la actualidad pueden estar cubiertas (*buried deposits*) o aflorar (*brine deposits*). En el caso de los depósitos de litio, las evaporitas son de carácter continental. Este tipo de depósito de litio constituye el 75% de la producción mundial de este elemento en la actualidad, con una concentración de 200 a 4.000 mg/l de Li en estas salmueras (Gruber *et al.*, 2011; Kesler *et al.*, 2012). En la Fig. 7 se muestra la distribución de estos depósitos en el mundo. A continuación se describen sus características principales recogidas por Bradley *et al.* (2013) y Munk *et al.* (2016).

- Se desarrollan bajo un clima hiperárido a semiárido (precipitación \approx 30-320 mm/año y temperaturas medias anuales de hasta 23°C). No obstante, aunque un clima con una razón precipitación/evaporación baja es favorable para el desarrollo de salares ricos en Li, parece necesario un flujo de agua volumétricamente importante para generar salares económicamente explotables, por ejemplo, regiones con una estacionalidad muy marcada y preferiblemente con una zona de recarga (precipitación) y otra de concentración (evaporación).
- Se presentan en cuencas cerradas donde existen salmueras en acuíferos poco profundos. Estos acuíferos suelen estar compuestos de halita y a menudo yeso, además de ceniza volcánica, gravas y arenas aluviales y tobas.

- Llevan asociada actividad hidrotermal (en ocasiones de origen magmático) que permite lixiviar el litio de su roca fuente y concentrarlo en el depósito evaporítico.
- La subsidencia tectónica en la región es importante.
- Existe una fuente de litio, que puede ser magmática (rocas volcánicas ricas en sílice), evaporitas y salmueras pre-existentes, arcillas hidrotermales (hectorita), o los propios fluidos hidrotermales de origen magmático.
- Todos estos factores se mantienen durante un tiempo suficiente para que se formen salares de litio. El tiempo necesario para que el litio se lixivie, se transporte y se concentre en los salares no es aún bien conocido, pero los depósitos de este tipo más importantes que se conocen hasta el momento son jóvenes (Neógenos).

Pegmatitas

Las pegmatitas son rocas de carácter ígneo y de composición comúnmente granítica, comunes en cinturones orogénicos (Fig. 7). Sus características distintivas son principalmente texturales y, con frecuencia, también composicionales. Así, el término “pegmatítico” suele hacer referencia a un tamaño de grano grueso a gigante. Sin embargo, dentro de este tipo de rocas también es común la presencia de textura aplítica así como de cristales con hábitos de crecimiento fuertemente direccionales, tales como esqueléticos o gráficos. Su morfología externa es variable, incluyendo formas tabulares, lenticulares, bulbosas e irregulares, con tamaños que varían desde unos pocos milímetros a varios decímetros de potencia, y corridas de hasta varios kilómetros. Pueden ser cuerpos homogéneos o mostrar una marcada zonación interna, con el desarrollo de zonas más o menos concéntricas, que crecen a menudo alrededor de un núcleo de cuarzo masivo (Fig. 8). Se encuentran encajadas dentro de otras rocas ígneas o metamórficas.

El amplio espectro que presentan estas rocas en cuanto a su composición química y paragénesis ha propiciado la proliferación de clasificaciones. Entre todas ellas, la más utilizada en los últimos años es la de Černý y Ercit (2005), en la que se distinguen dos familias principales de acuerdo a criterios geológicos, geoquímicos y paragenéticos: la familia LCT, en la que se incluyen pegmatitas enriquecidas en Li, Cs y/o Ta, normalmente asociadas a granitos orogénicos; y la familia NYF, con enriquecimientos en Nb, Y y/o F, y relacionadas con granitos anorogénicos. En esta clasificación se distinguen además cinco clases según su mineralogía y profundidad de emplazamiento, dentro de las cuales hay varias subclases, tipos y subtipos (Tabla 2).

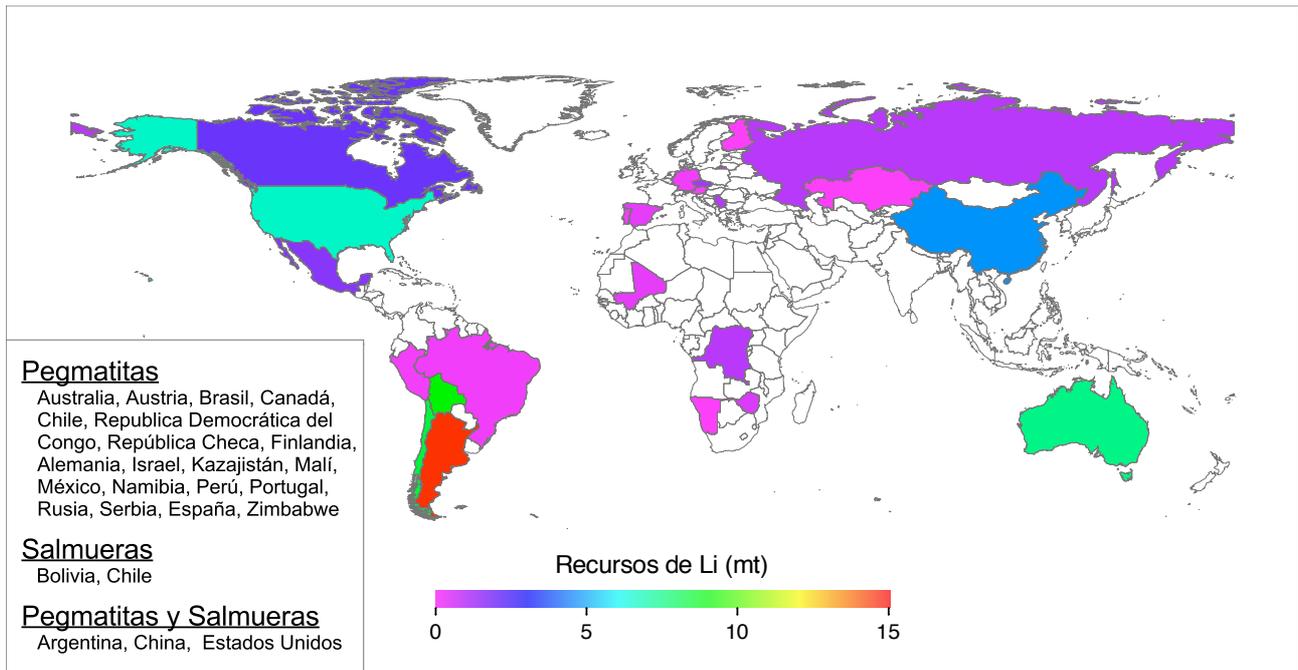


Fig 7. Distribución de las principales reservas de litio en el mundo, y listado de países según los tipos de depósito. Datos tomados de USGS (2019).

Las rocas pegmatíticas no suelen presentarse como cuerpos aislados, sino en grupos de varias unidades a varios centenares, que dan lugar a campos pegmatíticos. Estos en ocasiones pueden estar zonados, con un aumento del grado de enriquecimiento en elementos incompatibles y volátiles a medida que aumenta la distancia al plutón parental (Fig. 9).

En cuanto a la mineralogía de las pegmatitas graníticas, sus componentes principales son cuarzo, feldespatos

alcalinos y micas. Otros minerales comunes incluyen aluminosilicatos, berilosilicatos y borosilicatos, fosfatos de Fe-Mn y de Al-F y óxidos (Sn, Nb, Ta, U, Th y REE principalmente). Dado el grado de enriquecimiento extremo en elementos incompatibles (tales como Li, Rb, Cs, Sn, Nb, Ta, Be, B) que estas rocas pueden presentar, no es rara la presencia de minerales exclusivos de pegmatitas, algunos de ellos enriquecidos en litio, como petalita o espodumena (Tabla 3).

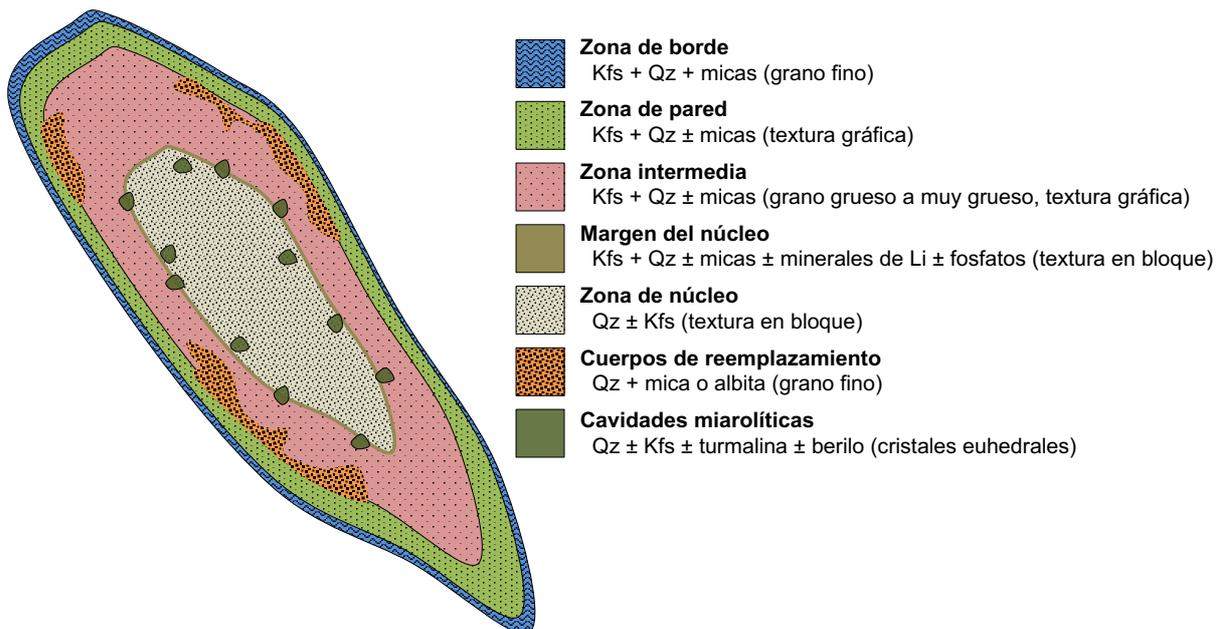


Fig 8. Esquema idealizado de la zonación interna que pueden presentar algunos cuerpos pegmatíticos. Escala: longitud aproximada entre 5cm y 20m. Abreviaturas: Kfs = feldespatos, Qz = cuarzo.

Tabla 2. Sistema de clases de la clasificación geológica, paragenética y geoquímica de las pegmatitas graníticas (Černý y Ercit, 2005).

<i>Clase</i>	<i>Subclase*</i>	<i>Tipo</i>	<i>Subtipo</i>
Abisal (AB)	AB-LREE		
	AB-HREE		
Moscovítica (MS)			
Moscovítica- elementos raros (MSREL)	MREL-REE		
	MREL-Li		
Elementos raros (REL)	REL-REE	allanita-monacita euxenita gadolinita berilo	berilo-columbita berilo-columbita-fosfatos espodumena petalita lepidolita elbaita ambligonita
	REL-Li	complejas	
		albita-espodumena albita	
Miarolíticas (MI)	MI-REE	topacio-berilo gadolinita-fergusonita berilo-topacio MI-espodumena MI-petalita MI-lepidolita	
	MI-Li		

* las categorías -REE corresponden a la familia de pegmatitas NYF, y las -Li corresponden a la familia LCT (ver texto).

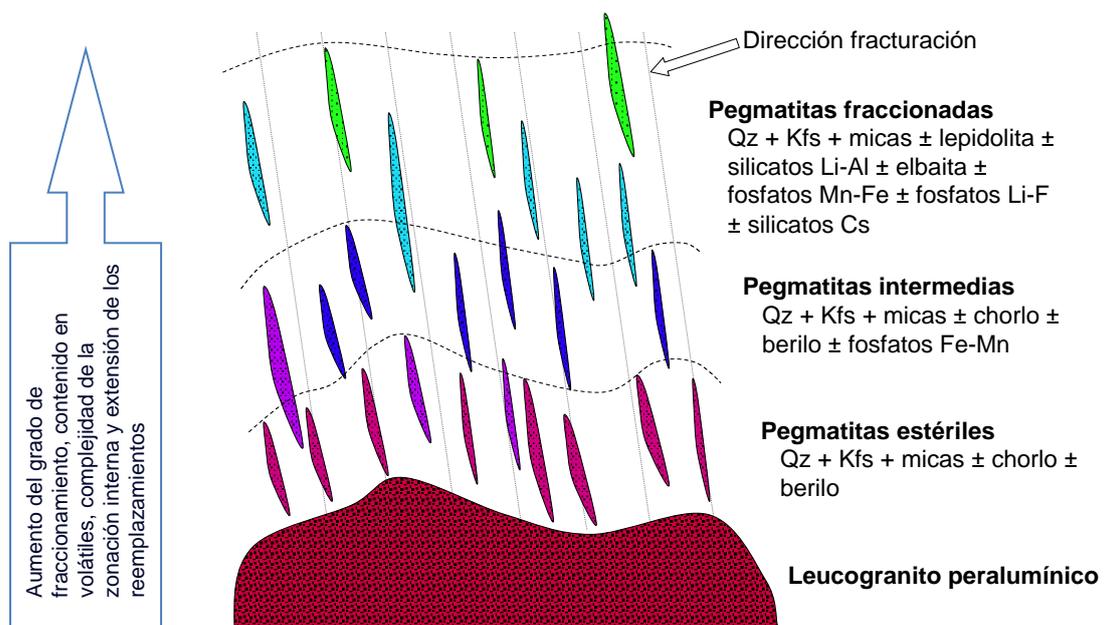


Fig 9. Esquema idealizado de la zonación regional que puede presentarse en algunos campos pegmatíticos. Abreviaturas: Kfs = feldespatos, Qz = cuarzo.

Tabla 3. Mineralogía asociada con algunos de los principales tipos de pegmatitas graníticas.

PEGMATITAS MOSCOVÍTICAS Y ABISALES		
<i>Principales</i>	<i>Secundarios y accesorios</i>	<i>Interés económico</i>
Plagioclasa (oligoclasa-albita)	Granate	Feldespato
Microclina	Apatito	Cuarzo
Cuarzo	Berilo	Moscovita
Moscovita	Xenotima	Berilo
Biotita	Zircón	Uraninita
Chorlo	Monacita	
	Uraninita	

PEGMATITAS DE ELEMENTOS RAROS (Familia LCT)		
<i>Principales</i>	<i>Secundarios y accesorios</i>	<i>Interés económico</i>
Albita	Moscovita	Espodumena
Cuarzo	Casiterita	Óxidos Nb-Ta
Microclina	Elbaita	Pollucita
Espodumena	Berilo	Berilo
Lepidolita	Ambligonita-Montebrasita	Lepidolita
	Petalita	Ambligonita-Montebrasita
	Trifilita-Litiofilita	Casiterita
	Óxidos Nb-Ta	Petalita
	Pollucita	

PEGMATITAS MIAROLÍTICAS (Familia LCT)		
<i>Principales</i>	<i>Secundarios y accesorios</i>	<i>Interés económico</i>
Cuarzo (variedades cristal de roca y cuarzo ahumado)	Moscovita	Cuarzo
Albita	Ambligonita-Montebrasita	Feldespatos
Microclina	Lepidolita	Topacio
Topacio	Espodumena	Lepidolita
Berilo	Petalita	Espodumena
		Petalita

En cuanto al origen de los fundidos pegmatíticos, desde hace décadas existen dos hipótesis principales, que no son necesariamente excluyentes. La teoría magmatogénica, según la cual los magmas pegmatíticos son producto de la cristalización fraccionada de magmas graníticos (Cameron *et al.*, 1949; Jahns, 1953; Jahns y Burnham, 1969; Černý, 1991; London, 2008; Roda-Robles *et al.*, 2018) ha sido la más aceptada durante el último medio siglo. Sin embargo, el modelo anatético que propone para los fundidos pegmatíticos un origen directo por fusión parcial (anatexia) de materiales principalmente metapelíticos, está ganando adeptos en los últimos años (Müller *et al.*, 2017; Novak *et al.*, 2013; Roda-Robles, 1993; Shaw *et al.*, 2016; Shmakina, 1983; Simmons *et al.*, 2016; Simmons y Webber, 2008; Stewart, 1978). Según estos modelos, los altos grados de enriquecimiento en elementos incompatibles que presentan con frecuencia las rocas pegmatíticas se

alcanzarían gracias a la acción de elementos fundentes (H₂O, F, B, Li y P principalmente) que favorecerían el fraccionamiento durante la cristalización del fundido original. La acción de estos fundentes es fundamental ya que:

- Hacen descender la temperatura de cristalización.
- Disminuyen la velocidad de nucleación.
- Disminuyen el grado de polimerización del fundido y la viscosidad.
- Aumentan la difusión y la solubilidad del agua en el fundido.

Al disminuir la temperatura del solidus, el fundido fuertemente subenfriado comenzaría a cristalizar a una temperatura menor, lo que propiciaría una cristalización rápida, que, según algunos cálculos termodinámicos, variaría desde unas pocas semanas para los cuerpos más

pequeños, hasta unos cientos de años para los más grandes (Webber *et al.*, 2005; Webber y Simmons, 2007). Esta cristalización estaría lejos del equilibrio, con la aparición de un menor número de cristales en la roca, que podrían alcanzar, por lo tanto, un mayor tamaño. Las texturas fuertemente direccionales observadas con frecuencia en estas rocas (cristales “en peine”, esqueléticos, bandeados, gráficos, etc.) también son atribuidas al fuerte subenfriamiento sufrido por los fundidos pegmatíticos debido al efecto de elementos fundentes (London, 2008).

Depósitos hidrotermales y roca encajante metasomatizada

Aunque menos frecuentes que las pegmatitas, algunas mineralizaciones de litio se encuentran en depósitos hidrotermales asociados a magmatismo granítico, tanto en cuerpos de greisenificación, generalmente en las zonas marginales de la intrusión, como en diques de cuarzo peribatolíticos. Su mineralogía es variada. En el primer caso, el litio se concentra principalmente en las micas (lepidolita, y en menor medida, zinnwaldita), mientras que en el caso de los diques de cuarzo, el litio aparece generalmente como constituyente de fosfatos de la serie amblygonita-montebrazita. El origen de estas mineralizaciones se atribuye a la actividad de fluidos hidrotermales de origen magmático, que se exsolvían del fundido al disminuir la temperatura de este, pudiendo llevarse algunos elementos fundentes y/o incompatibles, entre los que además del litio se pueden incluir el boro, flúor, fósforo, estaño, niobio y/o tántalo.

En ocasiones, principalmente si los materiales encajantes del granito o de los diques hidrotermales son de carácter metapelítico, estos pueden presentar un fuerte grado de metasomatismo, con un enriquecimiento notable en litio, flúor y/o boro.

DEPÓSITOS DE LITIO DE LA PENÍNSULA IBÉRICA

Tanto España como Portugal cuentan con importantes reservas de litio (Tabla 4, Fig. 10). Si bien en el país vecino en la actualidad existen varios proyectos mineros en explotación o en fase avanzada de exploración para la extracción del litio (p. ej. Sepeda, Almendra y Gonçalo), en España no existe actualmente ninguna mina en activo para la explotación de este metal. Las mineralizaciones de litio se localizan mayoritariamente en el oeste peninsular, y más concretamente en la Zona Centroibérica (ZCI) y en menor medida en la Zona de Galicia-Trás-os-Montes (ZGTOM), donde las principales concentraciones de este elemento se asocian a campos pegmatíticos, constituidos por decenas a centenas de diques aplopegmatíticos (Fig. 10), algunos de ellos con contenidos superiores al 1% en peso de Li₂O (Roda-Robles *et al.*, 2016, 2018). Otras mineralizaciones de litio menos abundantes aparecen en pegmatitas de berilo-fosfatos, en cúpulas leucograníticas muy diferenciadas, en venas hidrotermales y en su roca encajante metasomatizada (Fig. 10) (Pesquera *et al.*, 1999; Roda-Robles *et al.*, 2016, 2018).

Tabla 4. Mineralizaciones de litio de la península ibérica. Números según el mapa de la Fig. 10 (modificado de Roda-Robles *et al.*, 2016 y 2018).

	LOCALIDAD	TIPO DE MINERALIZACIÓN (roca encajante)	ASOCIACIÓN MINERAL*	MINERALES-Li**
1	Fregeneda-Almendra (Salamanca, España- Guarda, Portugal) Roda <i>et al.</i> (1999); Vieira <i>et al.</i> (2011)	Numerosas aplopegmatitas, algunas ricas en Li (micasquistos)	Qz, Kfs, Li-Ms, Spd, Ptl, Cst, Mtb	Espodumena Petalita Moscovita-Li Montebrazita
2	Barroso-Alvão (Vila Real, Portugal) Lima (2000); Martins <i>et al.</i> (2012)	Numerosas aplopegmatitas, algunas ricas en Li (micasquistos)	Qz, Kfs, Ms, Spd, Ptl, Cst, óxidos de Nb-Ta	Espodumena Petalita Lepidolita Montebrazita
3	Tres Arroyos (Badajoz, España) Garate-Olave <i>et al.</i> (2014); Garate-Olave (2018)	Aplopegmatitas, algunas ricas en Li (metasedimentos)	Qz, Kfs, Ms, Li-Ms, Mtb, Tpz, Cst, óxidos de Nb-Ta	Moscovita-Li Montebrazita
4	Gonçalo (Belmonte-Guarda, Portugal) Neiva y Ramos (2010)	Aplopegmatitas ricas en Li (granitos)	Qz, Kfs, Ms, Li-Ms, Amb, Ptl, Tpz, Tur, Cst, óxidos de Nb-Ta +Zwd en la roca de caja	Moscovita-Li Amblygonita Zinnwaldita
5	Segura (Portugal) Antunes <i>et al.</i> (2013)	Aplopegmatitas ricas en Li (micasquistos)	Qz, Kfs, Lpd, Mtb, Tpz, Cst, óxidos de Nb-Ta	Lepidolita Montebrazita
6	Lalin-Forcarei (Galicia, España) Fuertes-Fuente y Martín-Izard (1998)	Aplopegmatitas, algunas ricas en Li (metasedimentos)	Kfs, Qz, Spd, Ms, Mtb, Cst, óxidos de Nb-Ta	Espodumena Montebrazita
7	Queiriga (Alto Vouga, Portugal)	Pegmatitas perigraníticas (esquistos con andalucita)	Qz, Kfs, Ptl, Lpd, Spd, Tpz, Brl, Cst, óxidos	Petalita Lepidolita Espodumena

	Dias <i>et al.</i> (2013)		de Nb-Ta	
8	Seixoso-Vieiros (Vila Real, Portugal) Lima <i>et al.</i> (2009)	Aplopegmatitas + cúpula leucogranítica (metasedimentos)	Qz, Kfs, Ptl, Mtb, Spd	Petalita Montebrasita Espodumena
9	Cabeço dos Poupos (Sabugal, Portugal) Neiva <i>et al.</i> (2011)	Aplopegmatitas ricas en Li (granitos)	Qz, Kfs, Ms, Li-Ms, Zwd, Tur, Cst, óxidos de Nb-Ta, Ap, Trp	Moscovita-Li Zinnwaldita
10	Las Navas (Cáceres, España) Gallego Garrido (1992)	Aplopegmatitas ricas en Li (metasedimentos)	Qz, Kfs, Ms, Li-Ms, Mtb, Tpz, Spd, Cst, óxidos de Nb-Ta	Moscovita-Li Montebrasita Espodumena
11	Serra de Arga (Viana do Castelo, Portugal) Leal Gomes (1994)	Aplopegmatitas ricas en Li (metasedimentos)	Qz, Kfs, Ms, Ptl, Lpd, Spd, Cst, óxidos de Nb-Ta	Petalita Lepidolita Espodumena Montebrasita
12	Belvís de Monroy (Cáceres, España) Merino <i>et al.</i> (2013)	Aplopegmatitas ricas en Li (micasquistos)	Qz, Kfs, Lpd, Mtb, Tpz	Lepidolita Montebrasita
13	Valderodrigo (Salamanca, España) Junta de Castilla y León (1986)	Aplopegmatita rica en Li (micasquistos)	Qz, Kfs, Lpd, Tpz, fosfatos de Fe-Mn	Lepidolita Litiofilita
14	La Canalita (Salamanca, España) Llorens (2011)	Aplopegmatitas, algunas ricas en Li (metasedimentos)	Qz, Kfs, Ms, Li-Ms, Amb, Tpz, Cst, óxidos de Nb-Ta	Lepidolita Ambignonita
15	Puentemocha (Salamanca, España) Roda-Robles <i>et al.</i> (2012a)	Pegmatitas de berilo-fosfatos (granitos)	Qz, Ms, Kfs, Bt, Brl, fosfatos de Fe-Mn, sulfuros	Ferrisicklerita
16	Nossa Senhora da Assunção (Alto Vouga, Portugal) Dias <i>et al.</i> (2013)	Pegmatitas de berilo-fosfatos (granitos)	Qz, Kfs, Ms, Brl, Bt, fosfatos de Fe-Mn, fosfatos de Al, óxidos de Nb-Ta, sulfuros	Trifilita
17	Pedra da Moura (Ponte da Barca, Portugal) Leal Gomes <i>et al.</i> (2009)	Pegmatitas de berilo-fosfatos (granitos)	Qz, Ms, Kfs, Brl, fosfatos de Fe-Mn, sulfuros	Trifilita
18	Cañada (Salamanca, España) Roda <i>et al.</i> (2004)	Pegmatitas de berilo-fosfatos (gabros y granitos)	Qz, Ms, Kfs, Tur, Bt, Grt, Brl, fosfatos de Fe-Mn, óxidos de Nb-Ta, sulfuros	Trifilita Ferrisicklerita
19	Mangualde (Viseu, Portugal) Carvalho y Farinha (2004)	Pegmatitas de berilo-fosfatos (granitos)	Qz, Kfs, Ms, Brl, Bt, Grt, Tur, fosfatos de Fe-Mn, óxidos de Nb-Ta, sulfuros	Trifilita Ferrisicklerita
20	Seixeira-Fonte da Cal (Guarda, Portugal) Roda-Robles <i>et al.</i> (2008)	Pegmatitas de berilo-fosfatos (granitos)	Qz, Kfs, Ms, Brl, fosfatos de Fe-Mn	Ferrisicklerita
21	Pinilla de Feroselle (Zamora, España) Roda-Robles <i>et al.</i> (2012b)	Cúpula pegmatítica sobre granito (granitos y corneanas)	Qz, Ms, Kfs, Tur, Lpd, Bt, Zwd, fosfatos de Fe-Mn	Lepidolita Ferrisicklerita Elbaita Zinnwaldita
22	Argemela (Guarda, Portugal) Charoy y Noronha (1996)	Microgranito + Diques de cuarzo+albita con montebrasita	Qz, Kfs, Ms, Lpd, Mtb, Cst, óxidos de Nb-Ta	Lepidolita Ambignonita
23	Castillejo de Dos Casas (Salamanca, España) Martín-Izard <i>et al.</i> (1992); Roda-Robles <i>et al.</i> (2013)	Stockscheider sobre cúpula leucogranítica (granito y metasedimentos)	Qz, Kfs, Li-Ms, Ptl, Cst, Mtb, Tpz, fosfatos de Fe-Mn	Moscovita-Li Petalita Montebrasita Litiofilita
24	Golpejas (Salamanca, España) Martín-Izard <i>et al.</i> (1992)	Cúpula leucogranítica + Diques de cuarzo con montebrasita (granito y metasedimentos)	Qz, Kfs, Mtb, Cst, óxidos de Nb-Ta, Tpz	Montebrasita
25	Valdeflores (Cáceres, España) Pesquera <i>et al.</i> (1999)	Diques de cuarzo con montebrasita (micasquistos)	Qz, Mtb, Cst + Zwd, Lpd, Li-Ms en la roca de caja	Montebrasita Zinnwaldita Lepidolita
26	Massueime (Guarda, Portugal)	Diques de cuarzo con montebrasita	Qz, Mtb, Cst, sulfuros	Montebrasita

	Carvalho y Farinha (2004); Roda-Robles <i>et al.</i> (2012c)			
27	Barquilla (Salamanca, España) Martín-Izard <i>et al.</i> (1992)	Diques de cuarzo con montebrasita (metasedimentos)	Qz, Kfs, Mtb, Cst, óxidos de Nb-Ta, sulfuros	Montebrasita
28	El Trasquilón (Cáceres, España) Gallego Garrido (1992)	Diques de cuarzo con montebrasita (granitos)	Qz, Kfs, Mtb, Cst, óxidos de Nb-Ta, sulfuros	Montebrasita

*Abreviaturas: *Amb*-amblygonita; *Ap*-apatito; *Brl*-berilo; *Bt*-biotita; *Cst*-casiterita; *Grt*-granate; *Kfs*-feldespato; *Li*-*Ms*-moscovita de Li; *Lpd*-lepidolita; *Ms*-moscovita; *Mtb*-montebrasita; *Ptl*-petalita; *Qz*-cuarzo; *Spd*-espodumena; *Trp*-topacio; *Trp*-triplita; *Tur*-turmalina; *Zwd*-zinnwaldita. ** en negrita las fases más abundantes.

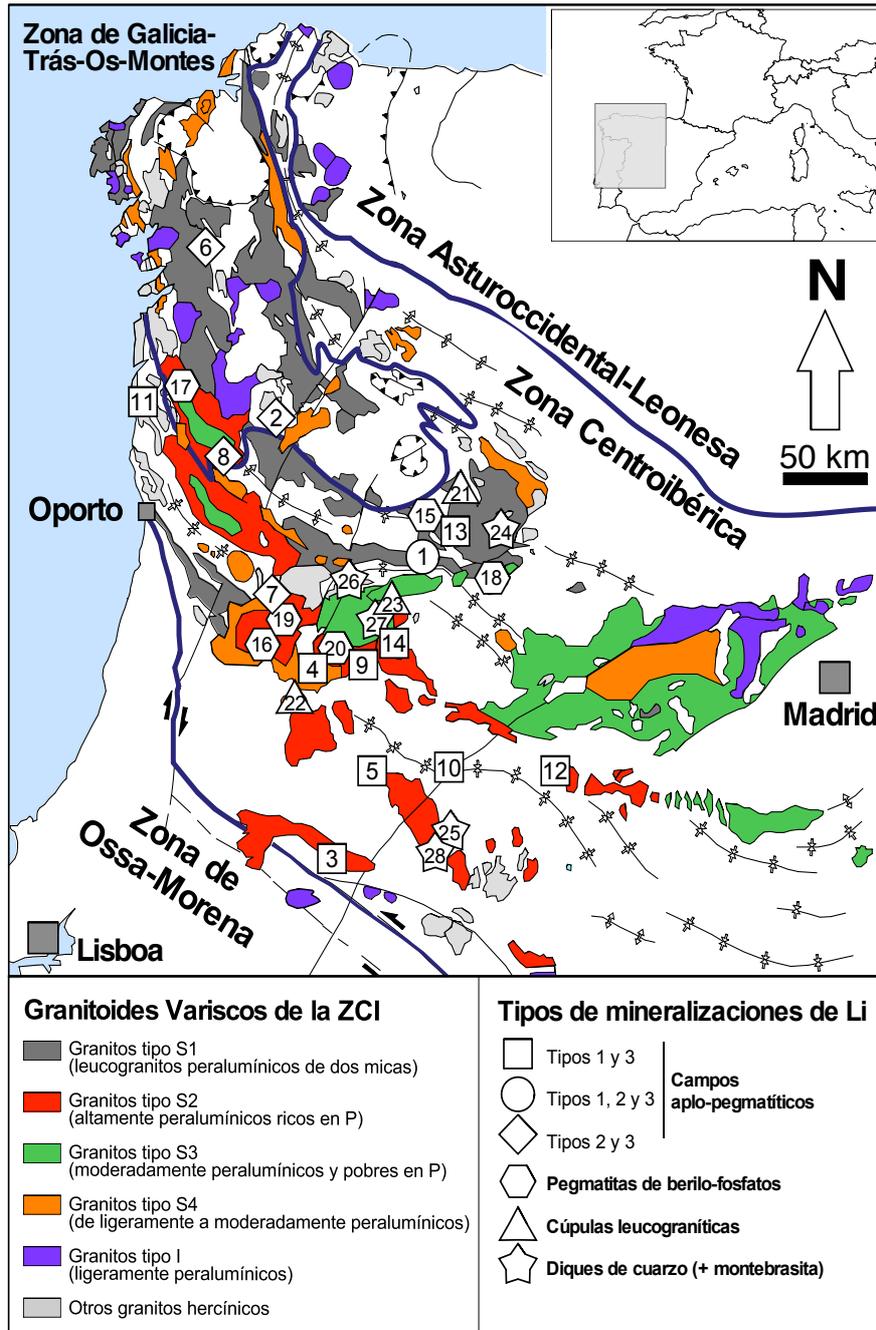


Fig 10. Distribución de los distintos tipos de mineralizaciones de litio de la península ibérica (modificado de Roda-Robles *et al.*, 2016 y 2018). Tipo 1: aplopegmatitas con lepidolita, Tipo 2: aplopegmatitas con espodumena y/o petalita, Tipo 3: aplopegmatitas simples. Números de las mineralizaciones según Tabla 4.

La ZCI junto con la ZGTOM representan el sector más occidental del cinturón Varisco europeo, formado en el paleozoico superior durante la colisión de Gondwana y Laurentia (Martínez-Catalán *et al.*, 1996). La ZCI es la región más interna del Macizo Ibérico. En su sector meridional está principalmente formada por rocas metasedimentarias que constituyen una potente serie (hasta 11.000 m) de pizarras y areniscas, con algún nivel volcanoclástico intercalado, de edad Neoproterozoico a Cámbrico inferior, y que es conocida como Complejo Esquisto Grauváquico (CEG). En la zona septentrional los materiales metasedimentarios son coetáneos pero menos potentes ($\approx 8.000\text{m}$) que los del sur, apareciendo intruidos por potentes formaciones de ortogneises glandulares cámbrico-ordovícicos. Tanto la ZCI como ZGTOM muestran abundantes intrusiones graníticas variscas, relacionadas por una parte con la creciente madurez térmica de la corteza engrosada durante la orogénesis varisca y, por otra, con la transición de un régimen tectónico compresivo a otro transtensional/transpresivo. La suma de estos factores derivó en una fusión cortical importante (p. ej., Bea *et al.*, 1999; Dias *et al.*, 2002) que daría lugar a un magmatismo granítico tardío a post-cinemático respecto a la fase de deformación regional D3 principalmente. Según su edad, estos granitos se clasifican como sin-D3 (320-310 Ma), tardi-D3 (310-306 Ma) y post-D3 (305-290 Ma) (e.g., Dias *et al.*, 1998). Según la clasificación químico-mineralógica de Villaseca (2011) y Roda-Robles *et al.* (2018), las rocas graníticas de la ZCI se pueden clasificar en cinco grandes series (Fig. 10): (1) leucogranitos peraluminicos de dos micas (S1); (2) granitos ricos en P, muy peraluminicos (S2); (3) granitos pobres en P, moderadamente peraluminicos (S3); (4) granitos moderadamente a ligeramente peraluminicos (S4); y (5) granitos de tipo I ligeramente peraluminicos (I). Con frecuencia, granitos de distintas series afloran en un mismo sector, dificultando el establecimiento de sus relaciones petrogenéticas con las mineralizaciones de Li.

A continuación se describen las principales características de los distintos tipos de mineralizaciones de litio de la península ibérica (Tabla 4). Para más información, ver Roda-Robles *et al.* (2016) y Roda-Robles *et al.* (2018).

Campos aplopegmatíticos

Es el tipo más común de mineralización de litio de la región. En estos campos, varias decenas a centenas de diques aparecen en grupos dando lugar a campos aplopegmatíticos. Estos diques pueden aparecer encajados tanto en rocas metasedimentarias como graníticas (Fig. 11a), presentando potencias muy variables, desde unos pocos centímetros hasta unos 30 m, y longitudes desde varios metros hasta aproximadamente 2 km (Fig. 11b). Su buzamiento varía desde cuerpos subverticales (p. ej. Fregeneda-Almendra, Barroso-Alvão), hasta sills subhorizontales. (p. ej. Gonçalo, Tres Arroyos). Dentro de los campos pegmatíticos, el grado de enriquecimiento en litio, flúor y otros elementos incompatibles no es el mismo para todos los cuerpos, mostrando en ocasiones una distribución zonal a partir del granito parental, con un aumento gradual en el contenido en elementos incompatibles a medida que aumenta la distancia al plutón. Si bien estos diques no suelen mostrar zonación interna, es muy común el desarrollo de unidades bandeadas, generalmente paralelas a los contactos con la roca de caja (Fig. 11c). También es frecuente la presencia de cristales de feldespato “en peine”, perpendiculares a los contactos con la roca encajante (Fig. 11d). Su mineralogía es simple, siendo albita, cuarzo y feldespato potásico sus minerales mayoritarios, y moscovita una fase minoritaria. En los diques más ricos en Li y F, la mica de Li (lepidolita y/o moscovita litinífera) puede llegar a ser muy abundante (hasta $\approx 35\%$ en volumen), mientras que en los diques ricos en Li, pero con menores contenidos en F, tanto la espodumena como la petalita pueden llegar a ser muy abundantes (hasta $\approx 50\%$ en volumen). Miembros de la serie ambligonita-montebrazita, fosfatos de Fe-Mn, casiterita y óxidos de Nb-Ta son los accesorios más comunes de estos diques.

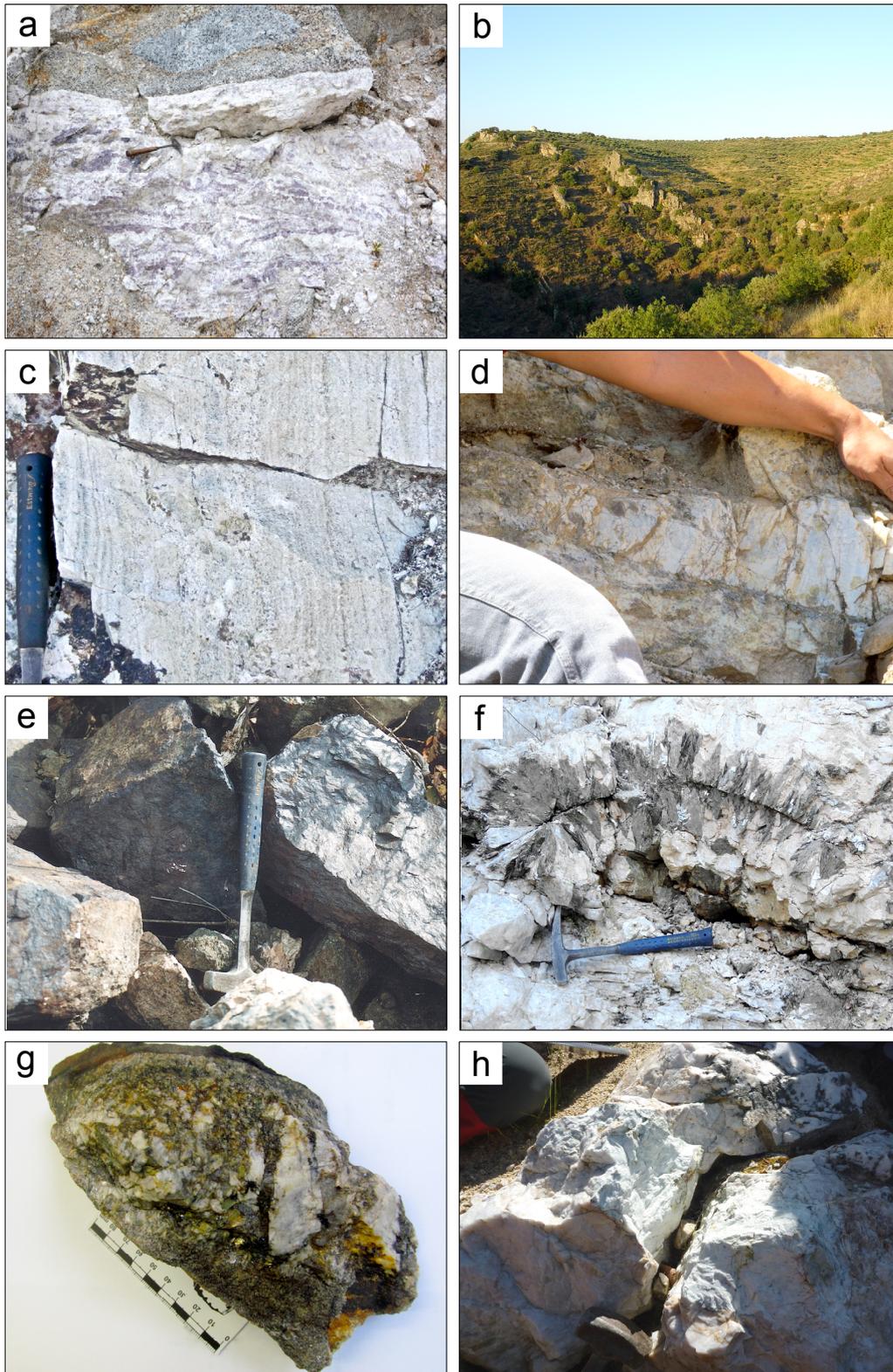


Fig 11. a) Sill aplopegmatítico encajado en un granito de dos micas metasomatizado (Gonçalo, Portugal) (para referencia de la escala, ver martillo); b) diques tabulares, subverticales de aplopegmatitas con petalita (campo Fregeneda-Almendra) (para referencia de la escala, obsérvese el edificio blanco de la zona superior izquierda); c) bandeado rítmico en un dique aplopegmatítico subvertical del campo de Barroso-Alvão; d) cristal de microclina con hábito “en peine”, creciendo perpendicular al contacto con los esquistos encajantes (Mina Alberto I, Fregeneda-Almendra); e) masas subredondeadas de fosfatos de Fe-Mn±Li de la mina Julita (Salamanca); f) cristales de moscovita radiales de grano muy grueso en feldespato potásico “en bloque”, en el margen del núcleo de cuarzo masivo -esquina inferior izquierda- (pegmatita Senhora da Assunção); g) muestra de la zona apical del “stockscheider” (cúpula leucogranítica) de Castillejo de Dos Casas (Salamanca), donde se observa el contacto con el esquisto encajante y el crecimiento de cristales de microclina “en peine”; h) dique de cuarzo con una masa subredondeada, de tamaño centimétrico y de aspecto lechoso, de montebrasita (Golpejas, Salamanca).

Pegmatitas de berilo-fosfatos

En la región de estudio estos cuerpos no suelen formar parte de campos pegmatíticos, sino que generalmente se presentan en pequeños grupos de dos a menos de una decena de cuerpos. En estas pegmatitas, el Li está contenido en fosfatos de Fe-Mn, principalmente de la serie trifilita-litiofilita (p. ej. Cañada, Pedra da Moura, Senhora da Assunção). Estos se presentan normalmente en masas subredondeadas de hasta 1,5 m de diámetro (Fig. 11e). Los principales minerales de estas pegmatitas son cuarzo, feldespatos, berilo, moscovita y fosfatos, con biotita, chorlo, óxidos de Nb-Ta y apatito como fases accesorias. Estas pegmatitas se presentan por lo general encajadas en rocas graníticas, mostrando a menudo un contacto gradual con la roca de caja. Es común que muestren una zonación interna bien desarrollada, con un núcleo de cuarzo prominente y un tamaño de grano grueso a muy grueso, principalmente en las zonas intermedias y en el margen del núcleo (Fig. 11f).

Cúpulas leucograníticas

Este tipo de mineralización es menos frecuente que los dos anteriores. En estas cúpulas, el Li puede aparecer concentrado en las unidades apicales o marginales de cúpulas leucograníticas muy fraccionadas, encajadas en materiales metasedimentarios. Los leucogranitos asociados son a menudo de grano fino y están enriquecidos en B, Li y F (Martín-Izard *et al.*, 1992; Roda-Robles *et al.*, 2012b; Roda-Robles *et al.*, 2015). Estos cuerpos pueden ser muy homogéneos o completamente heterogéneos. Texturas direccionales muy similares a las observadas en los diques de los campos aplopegmatíticos pueden ser comunes, incluyendo cristales de feldespato “en peine” y bandeados rítmicos de tipo “stockscheider” (p. ej. Castillejo de Dos Casas) (Fig. 11g). Por lo general el contacto entre la facies granítica y las pegmatíticas es gradual, lo que dificulta el establecimiento del límite entre ambas litologías (Roda-Robles *et al.*, 2012b; Roda-Robles *et al.*, 2015). Albita, cuarzo, feldespato potásico, micas y turmalina son sus minerales principales, mientras que topacio, fosfatos de Fe-Mn y Al-Li, casiterita y óxidos de Nb-Ta son sus principales accesorios.

Venas hidrotermales y roca encajante metasomatizada

El litio también se presenta enriquecido en venas hidrotermales de cuarzo asociadas a cuerpos leucograníticos, principalmente en el área central de la

ZCI (p. ej. Golpejas, Valdeflores, Barquilla, Massueime). Estas venas son normalmente delgadas (<1m), apareciendo encajadas en fracturas tanto dentro de los propios granitos asociados como de los materiales metasedimentarios del CEG. Se presentan en grupos, a menudo dando lugar a estructuras de tipo “stockwork”. En estos diques la fase portadora de litio es la montebrasita, con concentraciones variables de F, pero rara vez el suficiente para pasar al término amblygonita. La montebrasita aparece distribuida irregularmente dentro de las venas de cuarzo, en masas subredondeadas de hasta 50 cm de diámetro (Fig. 11h). Feldespatos, casiterita (en ocasiones explotable) y óxidos de Nb-Ta pueden aparecer como fases menores o accesorias.

Los metasedimentos encajantes de estas venas pueden presentar un enriquecimiento notable en Li (p. ej. Valdeflores). Este metal aparece especialmente concentrado en la mica, que pasa a tener una composición cercana a la zinnwaldita, mientras que algunos niveles se enriquecen en mayor o menor grado en turmalina, llegando en ocasiones a formarse verdaderos niveles de turmalinita, con hasta el 80% de este mineral.

Minerales de litio

Los principales minerales de litio dentro de los diferentes tipos de mineralización de la ZCI y ZGTOM incluyen los silicatos espodumena, petalita, lepidolita y zinnwaldita, y las series de fosfatos amblygonita-montebrasita y trifilita-litiofilita (Fig. 12, Tabla 5). La elbaita, de presentarse, suele hacerlo como una fase accesoría. En la Tabla 5 se muestran las fases principales de litio en los distintos tipos de mineralización, su fórmula estructural ideal y su contenido medio en litio. En general la mica de litio (lepidolita y moscovita litinífera en diques de campos aplopegmatíticos; y zinnwaldita en metasedimentos metasomatizados) es la fase más común en las mineralizaciones estudiadas. Los Li-aluminosilicatos espodumena y petalita son especialmente abundantes en algunos diques de los campos aplopegmatíticos del centro y norte de la ZCI y en ZGTOM. La montebrasita es más común en las venas de cuarzo hidrotermales y, en menor medida, en los diques aplopegmatíticos; mientras que los fosfatos de las series trifilita-litiofilita y ferrisicklerita-sicklerita son los portadores de Li de las pegmatitas de berilo-fosfatos. Más detalle sobre las características texturales y composicionales de todas estas fases se pueden encontrar en Roda-Robles *et al.* (2016).

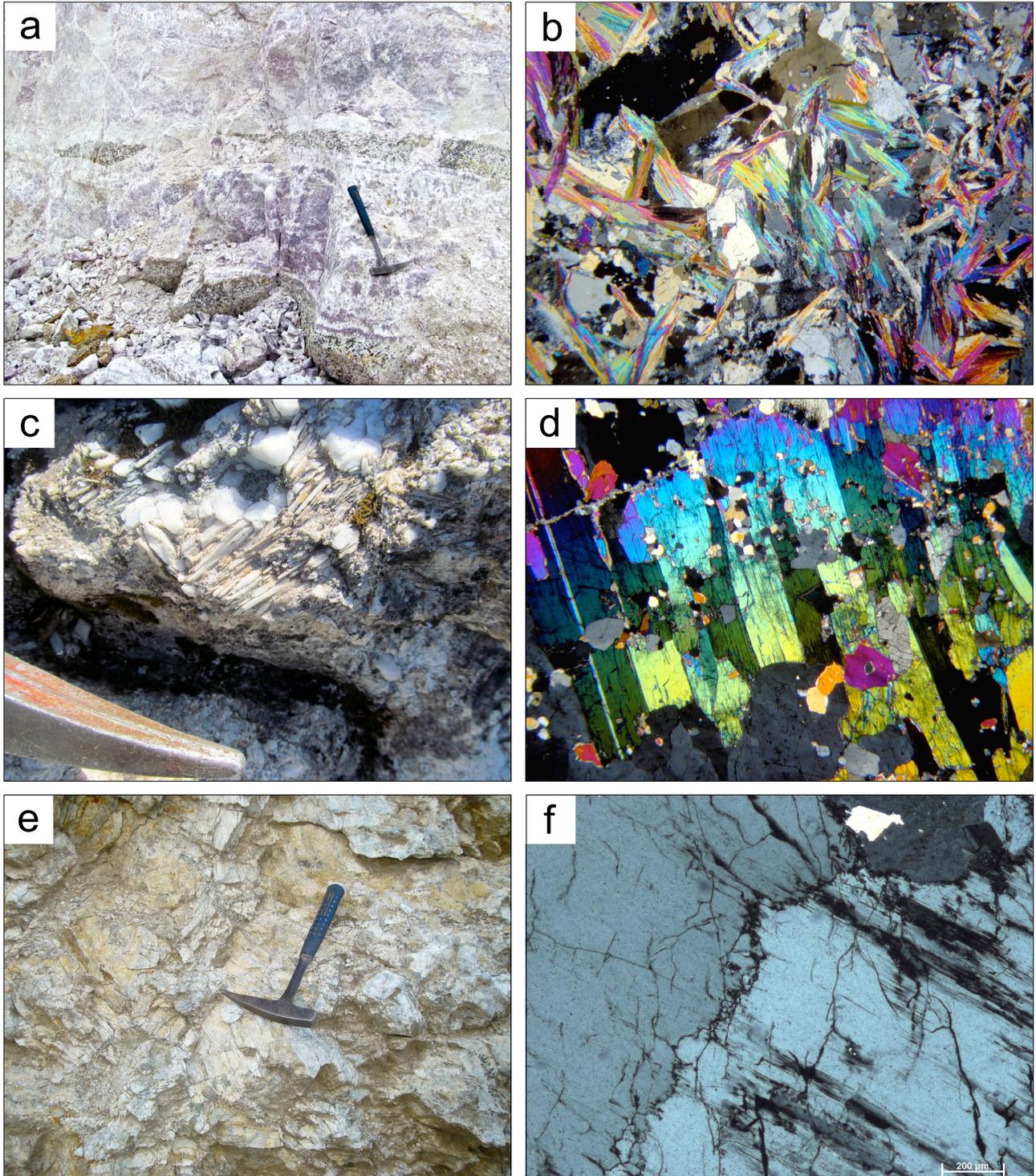


Fig 12. a) Lepidolita de grano fino (color lila) en diques aplopegmatíticos de Gonçalo; b) microfotografía de cristales de lepidolita “en abanico”, junto con cuarzo y albita de un dique de Fregeneda-Almendra; c) cristales de espodumena mostrando su fuerte exfoliación (Barroso-Alvão); d) microfotografía de cristales de espodumena primaria; e) cristales de petalita (Fregeneda-Almendra); f) microfotografía de cristales anbedrales de petalita de tamaño intermedio (Fregeneda-Almendra). En las fotografías b, d y f, el borde inferior de la imagen corresponde a 1,8mm.

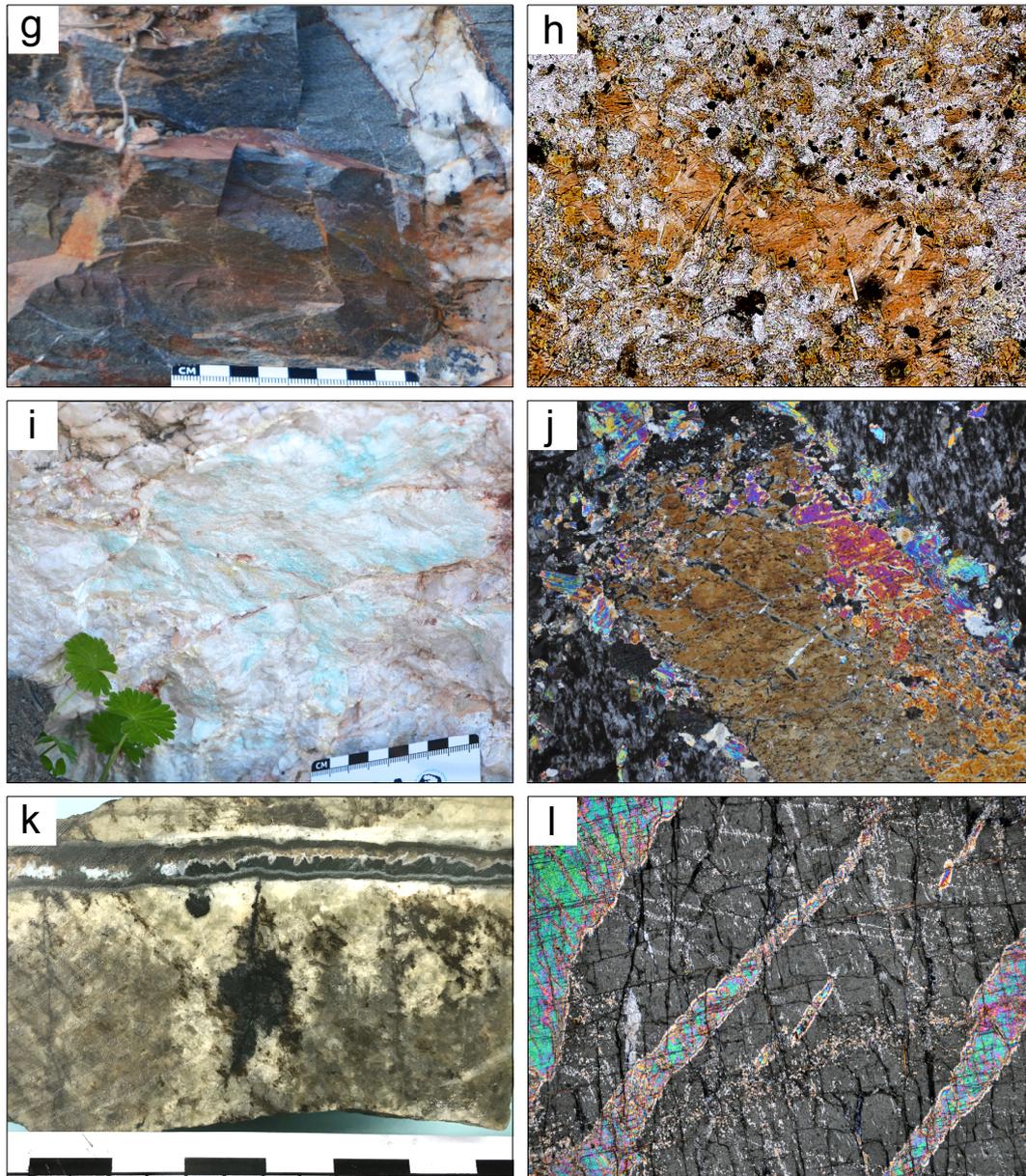


Fig 12. (continuación). g) roca metasedimentaria metasomatizada, rica en zinnwaldita y turmalina, ambas de tamaño ultrafino (Valdeflores); h) microfotografía de metapelita metasomatizada, rica en zinnwaldita y turmalina (Valdeflores); i) cristal de montebrazita parcialmente alterado a turquesa (azul) dentro de un dique hidrotermal de cuarzo (Valdeflores); j) microfotografía de un cristal de montebrazita (cúpula leucogranítica de Castillejo de Dos Casas); k) masa de trífilita (gris) surcada por una microfractura rellena de fosfatos secundarios (mina Julita, Salamanca); l) microfotografía de trífilita (gris) con abundantes lamelas de exsolución de sarcópsido (verde-azul-rosa) (mina Julita, Salamanca). En las fotografías j) y l) el borde inferior de la imagen corresponde a 1,8mm, mientras que en la fotografía h) dicho borde corresponde a 1mm.

Tabla 5. Principales minerales de litio de las pegmatitas de la Zona Centro Ibérica con sus contenidos en este elemento.

	MINERAL	FÓRMULA	Li ₂ O (% en peso)	Li (% en peso)
Silicatos	Espodumena	LiAlSi ₂ O ₆	8,03	3,73
	Lepidolita	K(Li,Al) ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (F,OH) ₂	7,7	3,58
	Petalita	LiAlSi ₄ O ₁₀	4,5	2,09
	Elbaita	Na(Li,Al) ₃ Al ₆ (BO ₃) ₃ Si ₆ O ₁₈ (OH) ₄	4,07	1,89
	Zinnwaldita	KLiFe ²⁺ Al(AlSi ₃)O ₁₀ (F,OH) ₂	3,42	1,59
Fosfatos	Triffilita-Litiofilita	Li(Fe ²⁺ , Mn ²⁺)PO ₄	9,47	4,40
	Amblygonita-Montebrazita	(Li,Na)Al(PO ₄)(F,OH)	7,4	3,44
	Ferrisicklerita-Sicklerita	Li _{1-x} (Fe ⁺⁺⁺ _x ,Mn ⁺⁺ _{1-x})PO ₄	< 9,47	< 4,40

Génesis de las mineralizaciones de Li de la península ibérica

Las pegmatitas graníticas se asocian generalmente con cinturones orogénicos, considerándose el resultado de la cristalización de fundidos formados en una corteza continental engrosada, gracias al calor generado por procesos mecánicos y/o caída radiogénica (Tkachev, 2011). Aunque en determinadas regiones un origen anatético es más probable, o al menos posible, un origen magmático para los fundidos pegmatíticos, a partir del fraccionamiento de magmas graníticos, es la hipótesis más aceptada en la actualidad. Los granitos asociados a las rocas pegmatíticas son a menudo leucogranitos peraluminicos, con protolitos metasedimentarios que incluyen metapelitas y grauvacas (p. ej. Puziewicz y Johannes, 1988; Patiño-Douce y Johnston, 1991). Teniendo en cuenta la variación química continua desde el granito parental hasta las aplopegmatitas más fraccionadas en algunos campos pegmatíticos y en algunas cúpulas leucograníticas del oeste peninsular, así como la composición química de las aplopegmatitas, muy diferente de la composición de cualquier fundido anatético, el fraccionamiento de magmas graníticos parece ser el mecanismo más plausible para explicar el grado de diferenciación extremo que presentan los diques aplopegmatíticos que aparecen agrupados en campos en esta región. Según los datos químicos disponibles, las series graníticas S1 y S2 muestran una clara compatibilidad química con estas rocas pegmatíticas, al contrario que los granitos de las series S3, S4 e I (Roda-Robles *et al.*, 2018). Si a esto se añaden las relaciones de campo y los datos geocronológicos, resulta plausible suponer que granitos pertenecientes a las series S1 y S2, que afloran al norte y al sur de la ZCI respectivamente, y que son pobres en Ca y ricos en P±F, son los mejores candidatos como magmas parentales de las aplopegmatitas enriquecidas en Li. Estos rasgos geoquímicos pueden ser muy relevantes a la hora de explicar el desarrollo de las aplopegmatitas de Li. Por una parte, el bajo contenido en Ca de los fundidos graníticos originales limitaría la cristalización temprana de apatito, lo que consecuentemente favorecería la acumulación de P y F en los fundidos residuales. Un mayor contenido en estos fundentes, junto con Li, B y H₂O reduciría notablemente la viscosidad del fundido, su temperatura de solidus y liquidus, y el grado de polimerización, a la par que aumentaría su difusividad y movilidad, y con ello su capacidad para segregarse y migrar a través de la corteza. La zonación vertical mostrada por algunas cúpulas leucograníticas, con un fraccionamiento gradual de abajo hacia arriba que da lugar a un fuerte enriquecimiento en litio y otros elementos incompatibles en las partes más apicales, sugiere que los fundidos pudieron sufrir un mecanismo de fraccionamiento “in situ”, dentro de la cámara magmática. Si el sistema se abre, el fundido

acumulado en la parte superior, de baja viscosidad y alta movilidad, podría escapar e inyectarse en fracturas u otras discontinuidades de la roca encajante, dando lugar a los campos aplopegmatíticos. La segregación vertical previa podría explicar la zonación observada en alguno de estos campos: el material más enriquecido en fundentes y volátiles, acumulado en las zonas más apicales llegaría a las áreas más distales al plutón. Si por el contrario, el sistema permanece cerrado, el resultado sería el desarrollo de una cúpula leucogranítica enriquecida en Li y otros elementos incompatibles (Roda Robles *et al.*, 2016, 2018).

La mineralogía y las texturas observadas en estas rocas deberían reflejar también estos procesos. Es necesario recordar que en las rocas aplopegmatíticas del oeste peninsular las micas son en general bastante escasas. Solo los diques con lepidolita pueden presentar hasta un 35% de lepidolita, pero en ese caso la mica tiene más F que OH. En el resto de los diques la proporción de mica es inferior al 5% generalmente. Sin embargo, el fundido pegmatítico no podía ser pobre en H₂O, ya que si así fuera, la viscosidad del fundido habría disminuido notablemente su movilidad, dificultando en gran medida su inyección en las fracturas abiertas que ahora ocupan. En este sentido hay que señalar que según estudios realizados sobre granitos de la serie S2, como por ejemplo el del Jálama, el contenido medio en H₂O de estos granitos es del 6% (Pesquera *et al.*, 2018), y con el fraccionamiento este contenido tiende a incrementarse. Por otra parte, los micaesquistos de la roca encajante suelen estar fuertemente turmalinizados en las proximidades de los diques. La biotita es reemplazada pseudomórficamente por pequeñas agujas de turmalina, lo que es probablemente el resultado de un episodio de metasomatismo. Estos dos hechos, tomados a la par, sugieren que una fase fluida fue exsuelta del fundido pegmatítico, probablemente debido al descenso de presión una vez que dicho fundido se inyecta en las fracturas. El B tiende a ir a la fase fluida, de manera que no es muy frecuente encontrar turmalina dentro de estos diques, pero sí en su roca encajante. Esta exsolución de una fase fluida, junto con la interacción entre el fundido y los metasedimentos, más fríos, resultó probablemente en un importante subenfriamiento del fundido pegmatítico. Este puede relacionarse con el carácter aplítico, el bandeo rítmico observado frecuentemente en estos diques, y con las texturas direccionales, tales como los cristales “en peine” de feldespatos y algunos aluminosilicatos de Li, observadas en estos cuerpos.

En el caso de las pegmatitas de berilo-fosfatos, estas presentan un menor grado de enriquecimiento en elementos raros (incluyendo el litio) que los diques aplopegmatíticos y las cúpulas leucograníticas. Estas pegmatitas encajan, por lo general, en granitos anatéticos de la serie S1, presentando frecuentemente

un contacto gradual con ellos. Teniendo todo ello en cuenta, se ha propuesto para estas pegmatitas un modelo genético que incluye grados intermedios de fraccionamiento in situ de fundidos graníticos peraluminicos de origen anatético (Roda-Robles *et al.*, 2012b, 2016). El bajo contenido inicial en Ca de los fundidos graníticos favorecería un comportamiento incompatible para el P, acumulándose en el fundido residual hasta grados intermedios de fraccionamiento, cuando su concentración es lo suficientemente alta para que el fundido se sature en fosfatos de Fe-Mn.

Los diques de cuarzo con montebrasita fueron posiblemente generados por la acción de fluidos hidrotermales asociados con los últimos estadios de fraccionamiento de un fundido parental, bien granítico o bien pegmatítico (Roda-Robles *et al.*, 2016). La elevada concentración de P necesaria para la formación de montebrasita podría ser explicada, al igual que en el caso de las pegmatitas de berilo-fosfatos, por el fraccionamiento del P como un elemento incompatible debido al bajo contenido en Ca del fundido granítico original, de carácter peraluminico y perfosfórico. En este caso, la escasez de componentes máficos en el fundido habría dificultado la formación de fosfatos de Fe-Mn, permitiendo la acumulación de P, junto con otros elementos incompatibles, como Li y F, hasta los últimos estadios de fraccionamiento, siendo todos estos elementos finalmente exsueitos junto con la fase fluida, en una etapa hidrotermal.

Por último, el origen de los fluidos que dieron lugar al intenso metasomatismo que muestran algunas de las rocas encajantes de los diques hidrotermales está probablemente ligado a magmas graníticos de las series S1 y S2. Tal como se indica en el párrafo anterior, estos fluidos serían exsueitos en los últimos estadios de cristalización fraccionada de los magmas parentales, y pudieron circular por las rocas metasomatizadas a través de la red tridimensional de fracturas en algunas de las cuales se alojan diques hidrotermales de cuarzo, en ocasiones también mineralizados con litio (p. ej. Valdeflores) (Pesquera *et al.*, 1999).

GUÍAS GEOLÓGICAS PARA LA EXPLORACIÓN DEL LITIO EN LA PENÍNSULA IBÉRICA

En esta región el potencial para litio más significativo corresponde a los campos aplopegmatíticos, que muestran un interés económico probado o inferido. En general los cuerpos mineralizados en este metal en la ZCI son relativamente pequeños, lo que hace su explotación más atractiva en áreas altamente pobladas, ya que pequeños trabajos mineros a cielo abierto, con una vida media corta, conllevan un menor impacto en las localidades próximas. A esto hay que añadir que generalmente en la misma zona aparece más de un cuerpo mineralizado, por lo que varias explotaciones de dimensiones reducidas pueden estar operativas al mismo

tiempo, lo que supone un mayor beneficio económico en áreas relativamente deprimidas de España y Portugal. Teniendo en cuenta que en todos los campos aplopegmatíticos aparecen cuerpos con distintos grados de enriquecimiento en litio, es necesario considerar algunas características comunes a todos ellos (estériles y ricos en litio) que pueden ayudar en la exploración de estos campos aplopegmatíticos.

Asociación espacial

El origen de las pegmatitas ricas en litio de la ZCI está relacionado con la orogenia varisca. Presentan una clara relación espacial con granitos de tipo S (series S1 y S2), pudiendo localizarse encajadas dentro de ellos, de forma marginal, o fuera de ellos, en materiales metamórficos. Estos suelen presentar un metamorfismo de baja presión, en facies de andalucita-sillimanita, biotita y/o clorita. Esta es una característica clave a la hora de evaluar áreas de mayor interés, especialmente en los primeros estadios de exploración y en la fase de trabajos de gabinete. En una fase posterior, con el fin de delimitar los objetivos, se deben aplicar técnicas de teledetección y de modelización predictiva mediante análisis estadísticos espaciales utilizando la distancia entre cuerpos vecinos. De esta manera se puede evaluar la relación espacial potencial entre los cuerpos pegmatíticos y las estructuras circundantes: zonas de cizalla dúctil, esquistosidad regional, familias de fallas y unidades graníticas (Silva *et al.*, 2018).

Morfología, zonación interna y texturas

Los cuerpos pegmatíticos se presentan con una variedad de tamaños, formas y relaciones estructurales con la roca encajante. El zonado interno, o la ausencia de este, las variaciones en la distribución del tamaño de grano, la asociación mineral, el hábito de los cristales o la fábrica de la roca, son características típicas de las pegmatitas. Algunas características texturales/mineralógicas son claves a la hora de identificar a las aplopegmatitas litiníferas de la ZCI:

- Carácter aplítico, frecuentemente bandeado, (Fig. 11a, c), con altos contenidos en albita. Esta puede ser muy blanca y, en sección delgada, muestra a menudo intercrecimientos mirmequíticos.
- Presencia de cristales “en peine” de feldespatos potásico, con forma de cuña y creciendo perpendicularmente a los contactos con el encajante (Fig. 11d). Algunos cristales muestran colores grises en muestra de mano. Al microscopio las exsoluciones peritéticas están ausentes o pobremente desarrolladas.
- Usualmente no se observan intercrecimientos gráficos de cuarzo y feldespatos.
- Baja proporción de micas, a no ser que el cuerpo sea rico en Li y F.

Durante la exploración regional se pueden generar mapas estructurales, litológicos y de alteración por métodos de teledetección, utilizando patrones geométricos, texturales, cromáticos y espectrales de las pegmatitas (Pereira *et al.*, 2013).

Signatura geoquímica

Las pegmatitas de elementos raros son bien conocidas por la diversidad y concentración de menas metálicas que contienen. Las pegmatitas de la familia LCT muestran una composición global peraluminica a subaluminica, con una signatura geoquímica con enriquecimiento en elementos tales como Li, Rb, Cs, Be, Sn, Ga, Ta > Nb, (B, P, F) (Černý y Ercit, 2005). Esta signatura geoquímica puede ser utilizada como una guía durante la exploración, especialmente a través de técnicas de muestreo de sedimentos de corriente, de suelos y de roca, a escala regional.

El análisis de sedimentos en corrientes de agua ha permitido en varias ocasiones la identificación de pegmatitas litiníferas en la península ibérica, asumiendo que las concentraciones medidas en dichos sedimentos pueden considerarse valores medios de referencia para una cuenca de captación (Vieira, 2010; Lima *et al.*, 2017).

La geoquímica de suelos convencional, basada en técnicas de fuerte lixiviación, típicamente representa la composición de la sobrecarga y los minerales constituyentes, y no la geoquímica del lecho de roca subyacente. Varios laboratorios han desarrollado métodos de ensayo como Ionic Leach™ (ALS), MMI™ (SGS) y Enzyme Selective Extraction (ACTLABS) centrados en las técnicas de exploración de Li en el suelo. Los iones metálicos se liberan de los depósitos minerales mediante un proceso de oxidación en profundidad, migran esencialmente verticalmente y se concentran en el perfil del suelo cerca de la superficie, sobre su fuente.

Una técnica bien conocida de exploración geoquímica se basa en la roca de caja metasomatizada alrededor de las pegmatitas LCT, con el desarrollo de un halo enriquecido en álcalis. Las aureolas metasomáticas de litio pueden superar los 100 m, pero la dispersión de Rb y Cs es más restringida (Černý, 1989). Algunos buenos indicadores de fraccionamiento son: K/Rb, K/Cs, Nb/Ta y Mg/Li (Selway *et al.*, 2005). Beus *et al.* (1968) indican que para la razón de Mg/Li el rango varía desde 50 para pegmatitas estériles hasta <1,0 para pegmatitas LCT con espodumena.

Geoquímica mineral

Los minerales formadores de roca comunes con contenidos elevados en elementos raros son a menudo una pista para las pegmatitas LCT "ciegas". A medida que el fundido cristaliza y se fracciona, los minerales se van enriqueciendo en elementos raros: el feldespato

potásico y la moscovita se enriquecen en Rb y Cs; el granate en Mn; y el apatito en F (Selway *et al.*, 2005). Micas, feldespato potásico y fosfatos son un buen ejemplo de cómo la geoquímica mineral puede ayudar en la exploración de las pegmatitas litiníferas (p. ej. Roda *et al.*, 2010; Vieira *et al.*, 2011). Normalmente, la moscovita encontrada en el subtipo de pegmatita con espodumena presenta valores de Li > 2000 ppm, Rb > 10000 ppm, Cs > 500 ppm, Ta > 65 ppm y una proporción K/Rb < 20 (Tindle *et al.*, 2002).

Observaciones finales

Un equipo multidisciplinar es la opción más rápida y segura para un programa de exploración exitoso, siendo el trabajo de campo, principalmente trabajo cartográfico, la base de la exploración. Los avances en las herramientas tecnológicas (p. ej. software, equipos analíticos) permiten una exploración de mayor resolución, a través de una modelización predictiva. Las pegmatitas LCT son depósitos complejos: la morfología, la zonación interna y las texturas son características clave, junto con una signatura geoquímica específica y la no respuesta geofísica reconocible (rocas no magnéticas, no conductoras, y con densidad/masa no distinguibles de las de su roca encajante). La teledetección, modelización predictiva, los sedimentos de corriente y la litogeoquímica son los métodos de exploración regional con mayor número de objetivos logrados en los depósitos de litio de la península ibérica.

EXONERACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Esta publicación es solo para fines informativos. Ni esta publicación ni la información contenida en ella constituyen una oferta, invitación, solicitud o recomendación en relación con la compra o venta de valores privados o de las compañías aquí mencionadas. Ciertas declaraciones contenidas en esta presentación se basan necesariamente en una serie de estimaciones y suposiciones prospectivas que, si bien son consideradas razonables por los autores, están sujetas inherentemente a importantes incertidumbres técnicas, comerciales, económicas, competitivas, políticas y sociales que podrían causar eventos reales, o resultados reflejados en este tipo de declaraciones prospectivas. Los autores niegan cualquier obligación de actualizar o revisar cualquier declaración prospectiva basada en información nueva, eventos futuros u otros.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen los comentarios de Mercedes Fuertes Fuente (Universidad de Oviedo) y de un revisor anónimo que han ayudado a mejorar el manuscrito. Esta investigación ha sido apoyada económicamente, entre otros, por los proyectos de investigación RTI2018-094097-B-I00 (MCIU/AEI/FEDER, UE) y GREENPEG (Horizon 2020, Proposal number: SEP-210597728) y por las ayudas a grupos consolidados de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) GIU/1216, GIU/1501 y GIU18/084.

REFERENCIAS

- Antunes, I.M.H.R., Neiva, A.M.R., Farinha Ramos, J.M., Silva, P.B., Silva, M.M.V.G., Corfu, F. (2013): Petrogenetic links between lepidolite-subtype aplite-pegmatite, aplite veins and associated granites at Segura (central Portugal). *Chem. Erde Geochem.*, **73**, 323-341. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemer.2012.12.003>
- Azevedo, M., Campagnolo, N., Hagenbruch, T., Hoffman, K., Ramsbotton, O. (2018): Metals and Mining. Lithium and cobalt - a tale of two commodities. 20p. [https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/metals%20and%20mining/our%20insights/lithium%20and%20cobalt%20a%20tale%20of%20two%20commodities.ashx](https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/metals%20and%20mining/our%20insights/lithium%20and%20cobalt%20a%20tale%20of%20two%20commodities/lithium-and-cobalt-a-tale-of-two-commodities.ashx). [consulta: 17 de junio 2019].
- Bea, F., Montero, P., Molina, J.F. (1999): Mafic precursors, peraluminous granitoids, and late lamprophyres in the Avila batholith: A model for the generation of Variscan batholiths in Iberia. *J. Geol.*, **107**, 399-419. <https://doi.org/10.1086/314356>
- Benchmark Minerals (2018): China's lithium price decline is not the full picture to an industry surging. <https://www.benchmarkminerals.com/chinas-lithium-price-decline-is-not-the-full-picture-to-an-industry-surging/> [consulta: 30 de marzo 2019]
- Beus, A., Berengilova, V., Grabovskaya, L., Kochemasov, L.A., Leonteva, L., Sitnin, A. (1968): Geochemical prospecting for endogenous ore deposits of rare elements (e. g. for tantalum). Academy of Science USSR, Dept. of Geology of USSR, Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements, Moscow, USSR (translated by the Department of the Secretary of State, Ottawa, Canada).
- Bloomberg (2016): If You Liked Palladium, You'll Love Lithium. Bloomberg gadfly articles. <https://www.bloomberg.com/opinion/articles/2016-02-26/lithium-electric-car-demand-tight-supplies-will-drive-boom> [consulta: 30 de marzo 2019]
- Bradley, D., Munk, L.A., Jochens, H., Hynek, S., Labay, K. (2013): A preliminary deposit model for lithium brines. U.S. Geological Survey Open-File Report 2013, **1006**, 6p. <https://pubs.usgs.gov/of/2013/1006/OF13-1006.pdf> [consulta: 30 de marzo 2019]
- Cameron, E.N., Jahns, R.H., McNair, A.H., Page, L.R. (1949): Internal structure of granitic pegmatites. *Econ. Geol. Monogr.*, **2**, 115.
- Carvalho, J.M.F. & Farinha, J.A.L.B. (2004): Lithium potentialities in Northern Portugal. 17th Industrial Minerals International Congress, Barcelona, 1-10.
- Černý, P. (1989): Exploration strategy and methods for pegmatite deposits of tantalum. in "Lanthanides, Tantalum and Niobium", P. Möller, P. Černý, F. Saupé eds., Springer-Verlag, Heidelberg, Alemania, 274-310.
- (1991): Rare-element granitic pegmatites. Part II: regional to global environments and petrogenesis. *Geosci. Can.*, **18**, 68-81. <https://journals.lib.unb.ca/index.php/gc/article/view/3723/4237>
- & Ercit, T.S. (2005): The classification of granitic pegmatites revisited. *Can. Mineral.*, **43**, 2005-2026. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.43.6.2005>
- Charoy, B. & Noronha, F. (1996): Multistage growth of a rare-element, volatile-rich microgranite at Argemela (Portugal). *J. Petrol.*, **37**, 73-94.
- Deutsche Bank (2016): Deutsche Bank markets research. Lithium 101- Welcome to the lithium-ion age. 179p. <http://www.metalstech.net/wp-content/uploads/2016/07/17052016-Lithium-research-Deutsche-Bank.compressed.pdf>. [consulta: 17 de junio 2019]
- Dias, G., Leterrier, J., Mendes, A., Simões, P.P., Bertrand, J.M. (1998): U-Pb zircon and monazite geochronology of post-collisional Hercynian granitoids from the Central Iberian Zone (Northern Portugal). *Lithos*, **45**, 349-369. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00039-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00039-5)
- , Simões, P.P., Ferreira, N., Leterrier, J. (2002): Mantle and crustal sources in the genesis of Late-Hercynian granitoids (NW Portugal): geochemical and Sr-Nd isotopic constraints. *Gondwana Res.*, **5**, 287-305. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70724-3](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70724-3)
- Dias, P.A., Pereira, B., Azavedo, J., Oliveira, J., Leal Gomes, C., Carvalho, J. (2013): Pegmatite productive terrains in the Variscan Granite hosts from Northern and Central Portugal. 23rd International Mining Congress & Exhibition of Turkey, 2121-2129.
- Fuertes-Fuente, M. & Martín-Izard, A. (1998): The Forcarei sur rare - element granitic pegmatite field and associated mineralization, Galicia, Spain. *Can. Mineral.*, **36**, 303-325.
- Gallego Garrido, M. (1992): Las mineralizaciones de Li asociadas a magmatismo ácido en Extremadura y su encuadre en la Zona Centro-Ibérica. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid. 323p.
- Garate-Olave, I. (2018): Petrography, mineralogy and origin of the rare elements granitic aplopegmatites from Tres Arroyos (Badajoz, Spain). Tesis doctoral. Dpto. de Mineralogía y Petrología, Universidad del País Vasco (UPV/EHU). 278p.
- , Roda-Robles, E., Gil-Crespo, P.P., Pesquera, A. (2014): Caracterización petrográfica y geoquímica de las micas asociadas al sistema granito-pegmatitas del área de Tres Arroyos (Alburquerque, Badajoz). *Macla*, **19**.
- Goldman Sachs (2015): The low carbon economy. GS SUSTAIN equity investor's guide to a low carbon world, 2015-25 Equity Research, 53p. <https://www.goldmansachs.com/insights/pages/new-energy-landscape-folder/report-the-low-carbon-economy/report.pdf>. [consulta: 17 de junio 2019]
- Gruber, P.W., Medina, P.A., Keoleian, G.A., Kesler, S.E., Everson, M.P., Wallington, T.J. (2011): Global lithium availability. A constraint for electric vehicles? *J. Ind. Ecol.*, **15**, 760-775. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00359.x>

- Jahns, R.H. (1953): The genesis of pegmatites. 2. Quantitative analysis of lithium-bearing pegmatite, Mora County, New-Mexico. *Am. Mineral.*, **38**, 1078-1112.
- & Burnham, C.W. (1969): Experimental studies of pegmatite genesis. 1. A model for derivation and crystallization of granitic pegmatites. *Econ. Geol.*, **64**, 843-864. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.64.8.843>
- Junta de Castilla y León (1986): Estudio de las posibilidades de minería de litio en Castilla y León. Proyecto 9-85. Informe Interno 13, 327p.
- Kesler, S.E., Gruber, P.W., Medina, P.A., Keoleian, G.A., Everson, M.P., Wallington, T.J. (2012): Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits. *Ore Geol. Rev.*, **48**, 55-69. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.05.006>
- Leal Gomes, C. (1994): Estudo estrutural e paragenético de um sistema pegmatóide granítico. O campo aplito-pegmatítico de Arga Minho, Portugal. Tesis doctoral. Universidade do Minho, Portugal. 695p.
- , Azevedo, A., Lopes Nunes, J., Dias, P.A. (2009): Phosphate fractionation in pegmatites of Pedra da Moura II claim – Ponte da Barca – Portugal. *Estudos Geológicos*, **19**, 172-176.
- Lima, A. (2000): Estrutura, Mineralogia e Génese dos Filões Aplitepegmatíticos com Espodumena da Região do Barroso-Alvão (Norte de Portugal). Tesis doctoral. Univ. Porto, Portugal and INPL, Nancy, France. 270p.
- , Rodrigues, R., Guedes, A., Novák, M. (2009): The rare elements-rich granite of Seixoso Area (Outeiro Mine). Preliminary results. *Estudos Geológicos*, **19**, 182-187.
- , Dias, C., Dias, F., Leal, S., Martins, T., Vieira, R., Noronha, F. (2017): A GIS approach to lithium exploration in the Barroso-Alvão area, northern Portugal. NGF Abstracts and Proceedings, PEG 2017 - 8th International Symposium on Granitic Pegmatites, Kristiansand, Noruega. 72-75.
- Llorens, T. (2011): Las mineralizaciones magmático-hidrotermales de Sn-W(Nb-Ta) del distrito de Navasfrías (SO de Salamanca). Tesis Doctoral. Universidad de Salamanca. 355p.
- London, D. (2008): Pegmatites. *Canadian Mineralogist*, Special Publication n° 10, 347 pp. ISBN: 978-0-921294-47-4
- Martín-Izard, A., Reguilón, R., Palero, F. (1992): Las mineralizaciones litíferas del oeste de Salamanca y Zamora. *Estud. Geol.*, **48**, 19-30. <https://doi.org/10.3989/egeol.92481-2>
- Martínez Catalán, J.R., Arenas, R., Díaz García, F., Rubio Pascual, F.J., Abati, J., Marquín, J. (1996): Variscan exhumation of a subducted paleozoic continental margin: The basal units of the Ordenes Complex, Galicia, NW Spain. *Tectonics*, **15**, 106-121. <https://doi.org/10.1029/95TC02617>
- Martins, T., Roda-Robles, E., Lima, A., De Parseval, P. (2012): Geochemistry and evolution of micas in the Barroso-Alvão pegmatite field, Northern Portugal. *Can. Mineral.*, **50**, 1117-1129. <https://doi.org/10.3749/canmin.50.4.1117>
- Merino, E., Villaseca, C., Orejana, D., Jeffries, T. (2013): Gahnite, chrysoberyl and beryl co-occurrence as accessory minerals in a highly evolved peraluminous pluton: The Belvís de Monroy leucogranite (Cáceres, Spain). *Lithos*, **179**, 137-156. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.08.004>
- Müller, A., Romer, R.L., Pedersen, R.B. (2017): The Sveconorwegian Pegmatite Province - thousands of pegmatites without parental granites. *Can. Mineral.*, **55**, 283-315. <http://dx.doi.org/10.3749/canmin.1600075>
- Munk, L.A., Hynek, S.A., Bradley, D.C., Boutt, D., Labay, K., Jochens, H. (2016): Lithium brines: a global perspective. Chapter 14. in “Rare earth and critical elements in ore deposits”, P. L. Verplanck and M. W. Hitzman, eds. *Rev. Econ. Geol.*, **18**, 339-365. <https://doi.org/10.5382/Rev.18.14>
- Neiva, A.M.R., & Ramos, J.M.F. (2010): Geochemistry of granitic aplite-pegmatite sills and petrogenetic links with granites, Guarda-Belmonte area, central Portugal. *Eur. J. Mineral.*, **22**, 837-854. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2010/0022-2072>
- , Silva, P.B., Corfu, F., Ramos, J.M.F. (2011): Sequential melting and fractional crystallization: Granites from Guarda-Sabugal area, central Portugal. *Chem. Erde Geochem.*, **71**, 227-245. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2011.06.002>
- Novák, M., Kadlec, T., Gadas, P. (2013): Geological position, mineral assemblages and contamination of granitic pegmatites in the Moldanubian Zone, Czech Republic; examples from the Vlastějovice region. *J. Geosci.*, **58**, 21-47. <https://doi.org/10.3190/jgeosci.132>
- Patiño Douce, A.E. & Johnston, A.D. (1991): Phase equilibria and melt productivity in the pelitic system: implications for the origin of peraluminous granitoids and aluminous granulites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **107**, 202-218. <https://doi.org/10.1007/BF00310707>
- Pereira, B., Azevedo, J., Oliveira, J., Dias, P., Leal Gomes, C., Fernandes, J., Carvalho, J. (2013): Prospecção project - pegmatite remote sensing and mapping. Final report. Sinergeo, Lda. and Universidade do Minho, 138p. https://www.researchgate.net/publication/281444153_Prospex_project_pegmatite_remote_sensing_and_mapping_Final_report. [consulta: 17 de junio 2019]
- Pesquera, A., Gil-Crespo, P.P., Torres-Ruiz, J., Roda-Robles, E. (2018): Insights into petrogenesis of the Jálama pluton (Central Iberian Zone, western Spain). *Int. Geol. Rev.*, **60**, 157-187. <https://doi.org/10.1080/00206814.2017.1316687>
- , Torres-Ruiz, J., Gil-Crespo, P.P., Velilla, N. (1999): Chemistry and genetic implications of tourmaline and Li-F-Cs micas from the Valdeflores area (Cáceres, Spain). *Am. Mineral.*, **84**, 55-69.
- Puziewicz, J. & Johannes, W. (1988): Phase equilibria and compositions of Fe-Mg-Al minerals and melts in water-saturated peraluminous granitic systems. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **100**, 156-168. <https://doi.org/10.1007/BF00373582>
- Raconteur (2018): Electrifying Autos. <http://res.cloudinary.com/yumyoshojin/image/uploa>

- d/v1/pdf/future-transport-2018.pdf [consulta: 30 de marzo 2019]
- Roda, E. (1993): Distribución, características y petrogénesis de las pegmatitas de La Fregeneda (Salamanca). Tesis doctoral, Universidad del País Vasco (UPV/EHU). 199p.
- Roda-Robles, E., Pesquera Pérez, A., Velasco Roldan, F., Fontan, F. (1999): The granitic pegmatites of the Fregeneda area (Salamanca, Spain): characteristics and petrogenesis. *Mineral. Mag.*, **63**, 535-558. <https://doi.org/10.1180/002646199548709>
- , —, Fontan, F., Keller, P. (2004): Phosphate mineral associations in the Cañada pegmatite (Salamanca, Spain): Paragenetic relationships, chemical compositions, and implications for pegmatite evolution. *Am. Mineral.*, **89**, 110-125. <https://doi.org/10.2138/am-2004-0114>
- , Mateus, S., Vieira, R., Martins, T., Vide, R., Lima, A., . (2008): Phosphate mineral associations in the Seixeira pegmatite (Bendada, Sabugal, Guarda, Portugal): preliminary results. Resumos do IX CGPLP—IX Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, Universidade de Cabo Verde / Universidade de Aveiro, Abstracts, p. 39.
- , Vieira, R., Pesquera, A., Lima, A. (2010): Chemical variations and significance of the phosphates from the Fregeneda-Almendra pegmatite field, Central Iberian Zone (Spain and Portugal). *Mineral. Petrol.*, **100 (1-2)**, 23–34. <https://doi.org/10.1007/s00710-010-0117-7>
- , Pesquera, A., Gil-Crespo, P.P., Torres-Ruiz, J. (2012a): The Puentemocha beryl-phosphate granitic pegmatite, Salamanca, Spain: internal structure, petrography and mineralogy. *Can. Mineral.*, **50**, 1573-1587. <https://doi.org/10.3749/canmin.50.6.1573>
- , —, —, — (2012b): From granite to highly evolved pegmatite: A case study of the Pinilla de Fermoselle granite–pegmatite system (Zamora, Spain). *Lithos*, **153**, 192-207. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.04.027>
- , —, Lima, A., Vieira, R., Gil-Crespo, P.P. (2012c): Origin and significance of phosphate minerals in the Central Iberian Zone (Spain and Portugal): implications for the behaviour of P during the Variscan magmatism. *European Mineralogical Conference EMC2012*, **1**, p. 381.
- , —, Gil-Crespo, P.P., Garate-Olave, I., Ostaikoetxea-Garcia, U. (2013): Textural and mineralogical features of the Li-F-Sn-bearing pegmatitic rocks from Castillejo de Dos Casas (Salamanca, Spain): preliminary results. 6th International Symposium on Granitic Pegmatites, p. 118-119.
- , —, —, —, Torres-Ruiz, J. (2015): The Li-rich aplopegmatite from Castillejo de Dos Casas (Salamanca, Spain): example of a highly fractionated granite-pegmatite system. *Mineral Resources in a Sustainable World*, 13th SGA Biennial Meeting 2015. *Proceedings*, **2**, 835-838.
- , —, —, Vieira, R., Lima, A., Garate-Olave, I., Martins, T., Torres-Ruiz, J. (2016): Geology and mineralogy of Li mineralization in the Central Iberian Zone (Spain and Portugal). *Mineral. Mag.*, **80**, 103-126. <https://doi.org/10.1180/minmag.2016.080.049>
- , Villaseca, C., Pesquera, A., Gil-Crespo, P.P., Vieira, R., Lima, A., Garate-Olave, I. (2018): Petrogenetic relationships between Variscan granitoids and Li-(F-P)-rich aplite-pegmatites in the Central Iberian Zone: Geological and geochemical constraints and implications for other regions from the European Variscides. *Ore Geol. Rev.*, **95**, 408-430. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.02.027>
- Roskill (2019): Lithium, 15th Edition, update 2 - January 2019. 16p.
- Rudnick, R.L. & Gao, S. (2003): The composition of the continental crust. in: “Treatise on Geochemistry”, H.D. Holland and K.K. Turekian, eds. Vol. 3, The Crust. Elsevier-Pergamon, Oxford, 1-64. <http://dx.doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/03016-4>
- Selway, J.B., Breaks, F.W., Tindle, A.G. (2005): A review of rare-element (Li-Cs-Ta) pegmatite exploration techniques for the Superior Province, Canada, and large worldwide tantalum deposits. *Explor. Min. Geol.*, **14 (1-4)**, 1–30. <https://doi.org/10.2113/gsemg.14.1-4.1>
- Shaw, R.A., Goodenough, K.M., Roberts, N.M.W., Horstwood, M.S.A., Chenery, S.R., Gunn, A.G. (2016): Petrogenesis of rare-metal pegmatites in high-grade metamorphic terranes: A case study from the Lewisian Gneiss Complex of north-west Scotland. *Precambrian Res.*, **281**, 338-362. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.06.008>
- Shmakin, B.M. (1983): Geochemistry and origin of granitic pegmatites. *Geochem. Int.*, **20**, 1-8.
- Silva, D., Lima, A., Gloaguen, E., Gumiaux, C., Noronha, F., Deveaud, S. (2018): Spatial geostatistical analysis applied to The Barroso-Alvão rare-elements pegmatite field (Northern Portugal). in: “GIS – An Overview of Applications”, A.C. Teodoro, ed. Book Series: Frontiers in Information Systems, Vol. 1, Chapter 4, Bentham eBooks, 67-101. https://www.researchgate.net/publication/323078664_Spatial_Geostatistical_Analysis_Applied_To_The_Barroso-Alvao_Rare-Elements_Pegmatite_Field_Northern_Portugal [consulta: 17 de junio 2019]
- Simmons, W., Falster, A., Webber, K., Roda-Robles, E., Boudreaux, A.P., Grassi, L.R., Freeman, G. (2016): Bulk composition of Mt. Mica Pegmatite, Maine, USA: implications for the origin of an LCT type pegmatite by anatexis. *Can. Mineral.*, **54**, 1053-1070. <https://doi.org/10.3749/canmin.1600017>
- & Webber, K.L. (2008): Pegmatite genesis: state of the art. *Eur. J. Mineral.*, **20**, 421-438. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2008/0020-1833>
- Statista (2018): Distribution of lithium end-usage worldwide in 2018, by area of application. <https://www.statista.com/statistics/268787/lithium-usage-in-the-world-market/> [consulta: 30 de marzo 2019]
- S&P Global Market Intelligence (2019): World Exploration Trends 2018. 12p. <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/documents/world-exploration-trends-march-2019.pdf> [consulta a 17 de junio 2019]

- Stewart, D.B. (1978): Petrogenesis of lithium-rich pegmatites. *Am. Mineral.*, **63**, 970-980.
- Tindle, A.G., Selway, J.B., Breaks, F.W. (2002): Electron microprobe and bulk analyses of fertile peraluminous granites and related rare-element pegmatites, Superior province, northwest and northeast Ontario: Operation Treasure Hunt. Ontario Geological Survey, Miscellaneous Release-Data 111. 4p. https://www.researchgate.net/publication/267510739_Electron_microprobe_and_bulk_analyses_of_fertile_peraluminous_granites_and_related_rare-element_pegmatites_Superior_Province_northwest_and_northeast_Ontario_Operation_Treasure_Hunt_Ontario_Geological_Survey?channel=doi&linkId=545155c60cf2bf864cba914c&showFulltext=true [consulta: 30 marzo 2019]
- Tkachev, A.V. (2011): Evolution of metallogeny of granitic pegmatites associated with orogens throughout geological time. Geological Society, London, Special Publications, **350**, 7-23. <http://dx.doi.org/10.1144/SP350.2>
- United States Geological Survey (2019): Lithium Statistics and Information. Mineral Commodity Summaries. Lithium. 98-99. <https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/mcs-2019-lithi.pdf> [consulta: 30 de marzo 2019]
- Vieira, R. (2010): Aplitopegmatitos com Elementos Raros da Região entre Almendra (Vila Nova de Foz Côa) e Barca d'Alva (Figueira de Castelo Rodrigo) Campo Aplitopegmatítico da Fregeneda-Almendra. Tese de Doutoramento, Universidade do Porto. 278p.
- , Roda-Robles, E., Pesquera, A., Lima, A. (2011): Chemical variation and significance of micas from the Fregeneda-Almendra pegmatitic field (Central-Iberian Zone, Spain and Portugal). *Am. Mineral.*, **96**, 637-645. <https://doi.org/10.2138/am.2011.3584>
- Villaseca, C. (2011): On the origin of granite types in the Central Iberian Zone: contribution from integrated U-Pb and Hf isotope studies of zircon. VIII Congresso Ibérico de Geoquímica - XVII Semana de Geoquímica, Libro de Actas, 29-34.
- Visual Capitalist (2018): Battery megafactory forecast: 400% increase in capacity to 1 TWh by 2028. <https://www.visualcapitalist.com/battery-megafactory-forecast-1-twh-capacity-2028/>. [consulta: 30 de marzo 2019]
- Webber, K.L., Simmons, W.B., Falster, A.U. (2005): Rapid conductive cooling of sheet-like pegmatites. Crystallization processes in granitic pegmatites, Int. Meeting, Elba Island, Italy. MSA web site, http://www.minsocam.org/msa/special/pig/pig_articles/Elba%20Abstracts%2022%20Webber.pdf. [consulta: 30 de marzo 2019]
- & — (2007): Crystallization Dynamics. Granitic Pegmatites: the state of the art – International Symposium. 06th – 12th May 2007, Porto, Portugal, 1-3.

Minería, mercados y precios de las tierras raras

Raquel Vergara Espuelas (1*)

(1) Quantum Minería S.L. C/Santander 3, 28040, Madrid (España)

* corresponding author: raquel.vergara@quantummineria.es

Abstract:

Rare-earth elements (REE) are one of the most important types of strategic raw materials for European Union's economy, as they are needed in all leading-edge industries, and because of the lack of its own production in Europe and the enormous dependence on a single provider. China is the major supplier of these elements, accounting for 62% of the total supply to the E.U. and 80% to USA. The risks associated with the REE's production concentration have caused concern in the market due to the vulnerability of the western high-tech industry.

With this geopolitical scenario, the Matamulas Project, whose main mineral is grey monazite (REE-bearing phosphate), is more relevant than ever: it would be the first European REE mine that could supply up to 32% of European demand in the next ten years. It has exceptional geochemical characteristics which make it a singular ore deposit because it has non-significant content of radioactive elements, it is rich in critical elements such as neodymium and praseodymium, and it offers the possibility of a simple exploitation without needing additives or waste tails.

Resumen:

Los elementos de las tierras raras (TTRR) figuran en lo más alto de la lista de materias primas estratégicas importantes para la economía de la Unión Europea, al ser necesarios para todas las industrias de vanguardia, carecer de producción propia y tener gran dependencia de un único proveedor. China es el principal suministrador de estos elementos, representando el 62% del abastecimiento de la U.E. y el 80% de EE.UU. Los riesgos derivados de la concentración de la producción de TTRR han generado preocupación en el mercado por la vulnerabilidad de la industria occidental de alta tecnología.

Con este escenario geopolítico, el proyecto Matamulas, cuyo mineral principal es la monacita gris (fosfato de TTRR), cobra más relevancia que nunca, ya que sería la primera mina europea de TTRR y podría abastecer el 32% de la demanda europea en los próximos diez años. Presenta unas características geoquímicas excepcionales que lo hacen un yacimiento singular por tener un insignificante contenido en elementos radiactivos, ser rico en elementos críticos como el neodimio y el praseodimio, y ofrecer la posibilidad de explotación sencilla sin necesidad de aditivos ni escombreras.

Palabras Clave: Elementos de Tierras Raras, Monacita Gris, Materias Primas Estratégicas. | **Key Words:** Rare Earth Elements, Grey Monazite, Strategic Raw Materials.

LAS TIERRAS RARAS

Las tierras raras (TTRR) constituyen un grupo de 17 elementos químicos, dentro del cual se encuentran los 15 lantánidos (bloque 'f' de la tabla periódica), el ytrio y el escandio. Todos ellos tienen características muy afines y se presentan normalmente asociados en la naturaleza, con radios iónicos muy parecidos (exceptuando el Sc, menor al resto) y comportamientos físico-químicos muy semejantes, lo cual hace difícil su separación. Son elementos críticos porque son, en la mayoría de sus aplicaciones, insustituibles, siendo vulnerables a las restricciones de suministro, y su uso, esencial.

Estos 17 elementos son los siguientes: lantano (^{57}La), cerio (^{58}Ce), praseodimio (^{59}Pr), neodimio (^{60}Nd), prometio (^{61}Pm), samario (^{62}Sm), europio (^{63}Eu), gadolinio (^{64}Gd), terbio (^{65}Tb), disprosio (^{66}Dy), holmio

(^{67}Ho), erbio (^{68}Er), tulio (^{69}Tm), yterbio (^{70}Yb), lutecio (^{71}Lu), escandio (^{21}Sc) e ytrio (^{39}Y).

Este grupo de elementos químicos se suelen dividir en dos categorías en función de su peso atómico: ligeros y pesados (Fig. 1). Las TTRR ligeras representan los lantánidos con los números atómicos más bajos (como es el caso del praseodimio o del neodimio, entre otros), mientras que las pesadas son las que presentan números atómicos más altos (como el disprosio o el terbio). Las TTRR pesadas son menos comunes que las ligeras, y en ellas se incluye el ytrio, a pesar de ser más ligero que las TTRR ligeras, por sus asociaciones físico-químicas con las TTRR pesadas en depósitos naturales.

Aunque son relativamente abundantes en la corteza terrestre, es difícil encontrar TTRR en concentraciones explotables. Esto hace que su obtención sea un reto económico significativo.

21 Sc	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd
TTRR Ligeras								
	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	39 Y
TTRR Pesadas								

Fig 1. Clasificación de las TTRR (serie de lantánidos más ytrio y escandio) en función de su configuración electrónica (adaptado de Castilloux, 2018).

Las TTRR se encuentran mayoritariamente en cuatro entornos geológicos: carbonatitas, sistemas ígneos alcalinos, depósitos de arcilla de adsorción de iones y depósitos de tipo placer. Si bien hay más de 200 tipos de minerales que contienen cantidades apreciables de algunas TTRR, solo se consideran tres de ellos como las principales fuentes de estos elementos: bastnasita, xenotima y monacita. La monacita y la xenotima (minerales del grupo de los fosfatos) pueden aparecer conjuntamente, aunque cristalizan a diferentes condiciones de temperatura y presión. Estos minerales pueden contener cualquier tipo de TTRR, ya sean ligeras o pesadas, aunque su enriquecimiento es variable en función del régimen de temperatura y presión en el cual se han formado. En el caso de la monacita, existen dos tipos: la amarilla y la gris. La monacita gris se caracteriza, entre otras peculiaridades, por los bajos contenidos en elementos radiactivos tales como torio y uranio. Esta característica es la que la diferencia completamente de la monacita amarilla común, de origen magmático o hidrotermal, la cual es rica en torio y uranio. La formación de la monacita gris aún no se comprende bien, pero hay estudios que la relacionan con la liberación y posterior fijación de los elementos de TTRR, inicialmente adsorbidos sobre minerales de arcilla, durante la diagénesis y el metamorfismo de bajo grado (Burnotte *et al.*, 1989).

En concreto, en el yacimiento Matamulas existe monacita gris con una densidad de 4,65 kg/l y una dureza de entre 5 y 5,5 en la escala de Mohs. Este depósito se encuentra inscrito en los términos municipales de Torrenueva y Torre de Juan Abad, en la provincia de Ciudad Real (España).

APLICACIONES DE LAS TIERRAS RARAS

Los lantánidos, el ytrio y el escandio son muy buenos conductores de la electricidad y destacan por sus propiedades magnéticas. Éstas pueden ser adaptadas, mediante la variación de composición de sus aleaciones, con el fin de crear imanes con comportamientos específicos según su uso final. Debido a sus propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas, las TTRR son fundamentales en campos como la energía, las telecomunicaciones y la medicina, así como para la

producción química, el refinado y ciertos procesos de fabricación, donde confieren resistencia y estabilidad. Sus principales usos son para:

- **Energía limpia:** en este campo son muy demandados los imanes permanentes de neodimio-hierro-boro (NdFeB), que han reemplazado a otras variedades de imanes al ser los que ofrecen mayor producción de flujo magnético por unidad de volumen. Son muy demandados en multitud de aplicaciones, empleándose en la fabricación de herramientas inalámbricas y motores, principalmente para vehículos eléctricos y aerogeneradores, contribuyendo a la mejora de su eficiencia energética y, con ello, a la reducción de las emisiones de CO₂.
- **Industria aeroespacial y defensa:** las TTRR son esenciales para sistemas de posicionamiento global (GPS), sónar, sistemas de defensa, tecnologías de resolución o láseres. En este caso, también son muy demandados los imanes permanentes por su gran resistencia magnética a altas temperaturas.
- **Productos de alta tecnología:** las TTRR son fundamentales para mejorar las prestaciones en dispositivos electrónicos, los cuales cada día requieren mayor rapidez, eficiencia, durabilidad, así como menor tamaño y peso. Estos productos son, principalmente, teléfonos móviles, ordenadores, tabletas, altavoces, discos duros, fibra óptica, etc.
- **Cuidado de la salud:** son esenciales para la medicina moderna, ya que permiten un diagnóstico precoz y tratamiento de una gran variedad de enfermedades mediante imagen por resonancia magnética o por tomografías por emisión de positrones. También son utilizados en máquinas quirúrgicas modernas como las de cirugía asistida por robots o en tecnologías pioneras para implantes cocleares. Además, los medicamentos que incorporan TTRR son utilizados para tratamientos de cáncer de pulmón, próstata, mama y huesos, así como para la artritis reumatoide.
- **Aleaciones metálicas:** en el campo de la metalurgia, las TTRR tienen numerosas aplicaciones, principalmente como potenciadores de determinadas características físicas: reducción del peso, mayor resistencia a torsiones, temperaturas o corrosión. Destacan las superaleaciones, las aleaciones de aluminio-magnesio, la aleación de cerio y lantano (*mischmetall*) que, junto al neodimio, se emplea en la fabricación de los electrodos negativos de las baterías recargables (Ni-MH).
- **Luminiscencia (materiales fosforescentes y fluorescentes):** las TTRR, en combinación con el fósforo, hacen posible visualizar las pantallas de los dispositivos electrónicos en color. También, se emplean en la fabricación de LED, lámparas fluorescentes compactas, dispositivos láser, sistemas de visión nocturna, etc.
- **Catalizadores y procesos químicos:** el cerio y el lantano se utilizan como potenciadores en los catalizadores que se emplean en la industria del petróleo para el craqueo catalítico de los

hidrocarburos ligeros. Las TTRR también están presentes en los catalizadores de los vehículos e incluso en los hornos pirolíticos.

- Cristales y cerámicas: las TTRR son ampliamente utilizadas en la fabricación de vidrio y cerámica, siendo ésta la primera industria en emplearlos. Se utilizan como componentes de pulido de vidrio, lentes y pantallas, además de como aditivo del propio vidrio para decolorarlo, en filtros de color y como material protector de la radiación UV. En cuanto a sus aplicaciones cerámicas, las TTRR se emplean para la fabricación de condensadores, sensores, celdas de combustible o como colorantes.
- Otras aplicaciones: estos elementos también se usan para la fabricación de fertilizantes, tratamiento de aguas, aditivos para pigmentos, en joyería, etc.

En la Figura 2 se observa la demanda de los elementos de TTRR, en 2017, por aplicación.

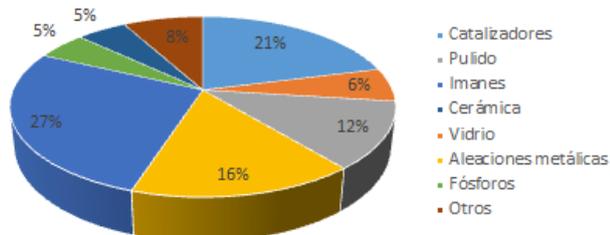


Fig 2. Porcentaje de demanda según el uso final de las TTRR (Chalmers y MacDonald, 2017).

MERCADO DE LAS TTRR

El mercado de TTRR ha estado dominado por China, tanto en términos de oferta como de demanda, durante más de 20 años. Además de producción y reservas, China ha sabido desarrollar la tecnología y el conocimiento necesario para poseer la mayor parte de la capacidad de procesamiento del mundo. Por ejemplo, entre 2014 a 2017, suministró el 80% de los óxidos de TTRR (REOs, por sus siglas en inglés) importadas por los EE.UU.

Con este escenario, la dependencia de China por parte de la industria occidental es absoluta, y las previsiones son que continuará siendo el líder del mercado en un futuro a corto-medio plazo. Esto se debe, principalmente, a que otros países, productores o con reservas, no tienen una capacidad de reacción rápida y suficiente como para hacer frente a las previsiones del mercado, al no estar la minería y el procesamiento de estos elementos lo suficientemente desarrollados.

Producción y reservas de TTRR

Según los datos del United States Geological Survey (2019), en 2018 China representó algo más del 70% de la producción mundial de TTRR, con 120.000 toneladas métricas. Aunque la producción de REOs ha ido

aumentando desde 2012 en prácticamente todos los países productores, destacando Australia y Rusia, la hegemonía por parte de China es clara (Fig. 3).

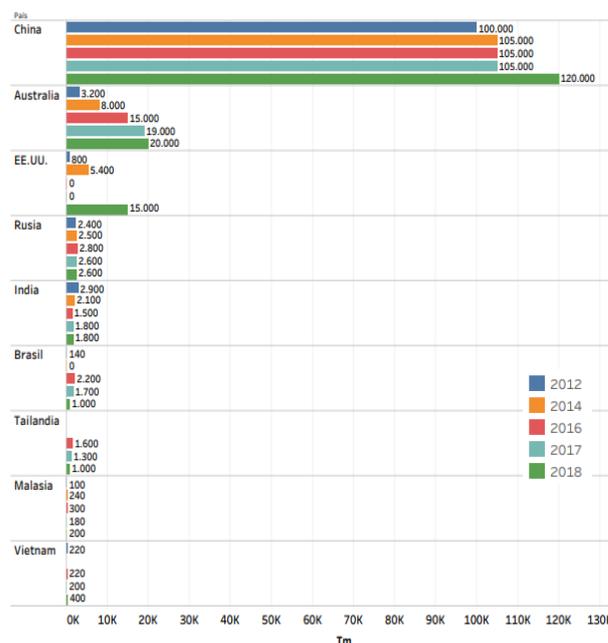


Fig 3. Principales países productores de REOs (en toneladas métricas) desde 2012 hasta 2018. Elaboración propia a partir de los datos de United States Geological Survey (2019).

La estimación de reservas mundiales totales de TTRR a finales de 2018 (Fig. 4) es de alrededor de los 120 millones de toneladas métricas. China representa aproximadamente el 38% de las reservas, con 44 millones de toneladas, seguido de países como Brasil, Vietnam, Rusia, India y Australia (United States Geological Survey, 2019).

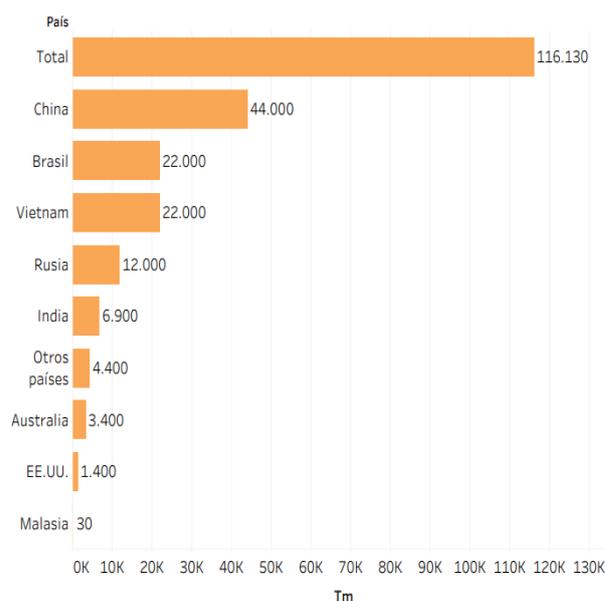


Fig 4. Reservas de REOs mundiales por país (en miles de toneladas métricas), estimadas a finales de 2018. Elaboración propia a partir de los datos de United States Geological Survey (2019).

En EE.UU. la única mina de TTRR en producción es la de Mountain Pass (California), cuya producción total es enviada a China (en forma de concentrado) para ser refinada en plantas de procesamiento (Mining Technology, 2015). Este depósito, cuya explotación a gran escala comenzó en los años 60, ha tenido periodos de alta actividad y otros de interrupción, en respuesta a restricciones ambientales y a la competencia de proveedores chinos. En 2015, tras una gran inversión para la construcción de una planta de procesamiento de concentrado de TTRR, iniciada en 2011 y cuando ésta estaba en plena producción, la empresa propietaria quebró y tuvo que abandonar su actividad. En el tercer trimestre de 2017, un grupo inversor, mayoritariamente estadounidense pero con participación china, compró la mina y comenzó su producción a principios de 2018, enviando el concentrado a China, tal y como se ha expuesto anteriormente. Sin embargo, la estrategia empresarial del grupo es reanudar la operación de la planta de separación química en 2020, para producir directamente REOs, minimizando la dependencia de China y garantizando su autoabastecimiento.

Por otra parte, en mayo de 2019, la empresa australiana Lynas Corporation, Ltd. (en adelante Lynas) la primera empresa productora de este mineral fuera de China y propietaria de la mina Mount Weld, ha anunciado una gran inversión para la construcción de una planta de tratamiento (*upstream*) cerca del yacimiento, manteniendo el procesamiento (*downstream*) en Malasia, cerca de sus clientes naturales. Con esta estrategia la empresa espera aumentar su producción de óxidos de neodimio y praseodimio a 10,5 kt al año. El mineral extraído tiene un alto porcentaje de elementos radioactivos, lo cual ha sido el desencadenante de una serie de problemas con el gobierno malayo, quienes a finales de 2018 obligaban a Lynas a retirar de su territorio 450.000 toneladas de residuos radioactivos almacenados en su planta de procesamiento. Esta exigencia debe cumplirse antes de septiembre 2019, pero la empresa ya ha anunciado que le será imposible acometerla dentro los plazos establecidos.

Consumo y precios de las TTRR

En los próximos años se espera un aumento de la demanda de las TTRR a nivel global, pasando de 120.000 t de REOs en 2017 a 190.000 t en 2026 (Castilloux, 2017). Esta previsión de aumento sustancial del consumo se debe, principalmente, a una mayor necesidad de componentes para cuya fabricación se utilizan estos REOs, como es el caso de los imanes permanentes de NdFeB empleados en energías limpias.

Según Castilloux (2018), la demanda prevista para los próximos diez años de óxidos de neodimio, praseodimio y disprosio es mayor que la producción estimada, lo que desequilibrará la balanza comercial entre oferta y demanda. En el caso concreto del óxido de disprosio, este desequilibrio se produciría incluso si se redujese su uso un 30% en la fabricación de diversos componentes

(Fig. 5). Por el contrario, esto no ocurrirá con otros óxidos de TTRR, como el cerio o el samario, para los cuales se prevé que existirá un excedente de producción.

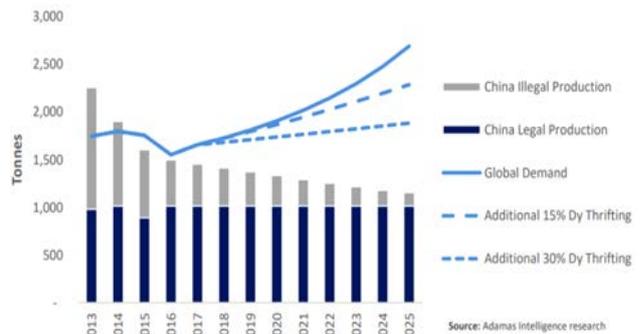


Fig. 5. Histórico y previsión de la producción de Dy en China (legal e ilegal). Demanda mundial de Dy hasta 2017, y previsión hasta 2025 con tres posibles escenarios: demanda de Dy esperada, con una reducción de 15% en su uso en imanes permanentes, y con reducción del 30% (Castilloux, 2018).

En cuanto a los precios de estos elementos (Fig. 6), se mantuvieron constantes durante el periodo comprendido entre 1990 y 2010. A partir de ese momento los precios de algunos REOs aumentaron de forma significativa, alcanzando un nivel máximo a mediados de 2011, lo que demuestra la volatilidad de su mercado, antes de disminuir a lo largo de los dos años siguientes por la desaceleración económica y el reciclado de algunos de estos elementos, que redujeron el consumo unitario de TTRR. Como ejemplo, el óxido de Nd que incrementó su precio en 6 veces, para luego bajar alrededor de los 80\$/kg.

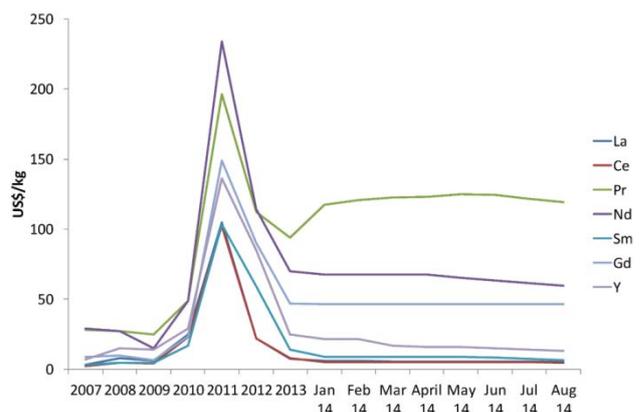


Fig. 6. Evolución de los precios (en \$/kg) de varios REOs de 2007 hasta mediados de 2014 (Nawsbad et al., 2014).

Entre 2014 y principios de 2017 los precios de los óxidos de Nd y Pr, entre otros, se estabilizaron, mostrando una clara resistencia a un mayor declive. Sin embargo, otros óxidos, como el de disprosio o el de erbio, tuvieron un incremento significativo a principios de 2015, para luego disminuir y mantenerse casi invariables. En mayo de 2017, los precios de algunos REOs ligeros, especialmente el de neodimio y el de praseodimio, comenzaron a subir debido al impulso de las energías renovables y al hecho de que China emprendió una serie de acciones contra la producción ilegal en sus propias

minas. El máximo se alcanzó en agosto de 2017 y, aunque se preveía que esta tendencia se mantendría a corto-medio plazo, el precio volvió a caer en los meses siguientes. No obstante, esta bajada no llegó a los niveles de años anteriores, manteniéndose desde entonces prácticamente constantes. En la Figura 7 se muestran los precios (en \$/kg) de los óxidos de Dy, Er, Eu, Nd y Pr, desde finales de 2014 hasta el tercer trimestre de 2019, existiendo una clara diferencia entre las TTRR pesadas y las ligeras (las primeras más caras al ser más buscadas y su separación más costosa). A pesar de ello, se puede observar que todos ellos tienen un comportamiento similar y reaccionan a los acontecimientos del mercado de manera análoga.

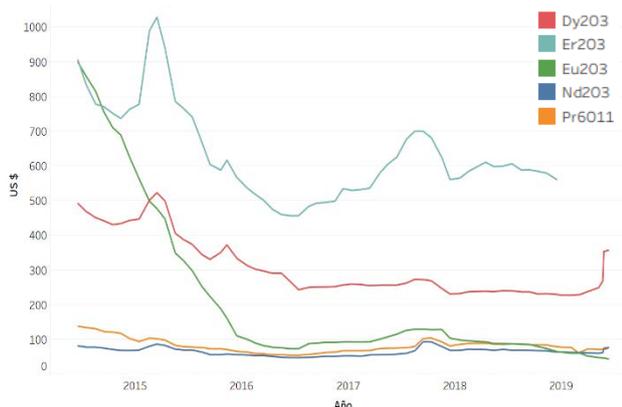


Fig 7. Evolución de los precios (en \$/Kg) de varios REOs desde finales de 2014 hasta el tercer trimestre de 2019. Elaboración propia a partir de los datos de KITCO (2019).

Teniendo en cuenta la escasez de suministro prevista, expuesta anteriormente, ligada a barreras ambientales y arancelarias, la mayoría de los analistas esperan un crecimiento importante del precio de ciertos óxidos de TTRR (especialmente de Nd, de Pr y de Dy).

Situación europea y española

Europa no tiene producción propia y se abastece, principalmente, de las TTRR procedentes de China. Por ello, y con el plan de paliar la dependencia de China y cumplir los objetivos vinculantes recogidos en el marco sobre Clima y Energía para 2030, la Unión Europea está promoviendo el estudio y la extracción de estos minerales en su territorio, con proyectos tales como EURARE (EURARE, 2017), que se llevó a cabo entre 2013 y 2017.

El objetivo principal de este proyecto era establecer las bases para el desarrollo sostenible de la industria europea de elementos de TTRR, reduciendo la dependencia del suministro. Se trabajó para definir y evaluar los recursos de TTRR explotables, y desarrollar tecnologías sostenibles y eficientes que permitiesen el procesamiento y refino de los concentrados para la obtención de óxidos, metales y aleaciones de TTRR, minimizando los residuos asociados y cumpliendo la normativa ambiental europea. Aunque actualmente no hay ningún yacimiento en

producción, Europa posee numerosos depósitos e indicios de TTRR (Fig. 8), en los que se centró el proyecto EURARE. En concreto, existen cuatro minas con un alto grado de exploración de reservas y avance tecnológico en plantas piloto de beneficio y extracción mineral. Estas minas son: Kvanefjeld y Kringlerne (depósitos encajados en rocas ígneas alcalinas) en el sur de Groenlandia, Norra Kärr (depósito intrusivo de nefelina-sienita peralcalina, enriquecido en TTRR pesadas) en el sureste de Suecia, y Aksu Diamas (depósito de tipo placer) en Turquía. Los tres primeros se podrían poner en marcha, como pronto y según las condiciones de mercado del momento, en 2020, pudiendo convertirse en proveedores europeos de varios tipos de productos de TTRR.



Fig 8. Mapa de los depósitos, recursos e indicios de TTRR en Europa hasta 2017. BGS © UKRI, Proyecto EURARE 2013-2017 (British Geological Survey, 2017).

Sin embargo, en Europa existen barreras significativas tanto para el lanzamiento de nuevos proyectos mineros como para la implantación de plantas de procesamiento y refino de concentrados minerales. Si bien es cierto que se ha demostrado la viabilidad técnica del tratamiento metalúrgico y separación química de las TTRR que podrían producirse en nuestro territorio, se requiere una gran inversión para la construcción y puesta en marcha de las respectivas plantas de procesamiento. Las empresas promotoras de estos proyectos tienen que asumir una gran inversión y, en la mayoría de los casos, hacer frente a una importante oposición social. Por ello, los gobiernos de todos los estados miembros deberían promover la exploración y explotación de proyectos vitales para la economía de la UE, siempre exigiendo el estricto cumplimiento de la legislación ambiental vigente.

Hasta 2010, España estaba a la cabeza en consumo de energía primaria procedente de las energías renovables, y actualmente representa el 17% de la energía consumida.

Se ha pasado de tener 2 megavatios instalados en 1990 a 23.200 megavatios registrados en 2018. Esta tendencia energética se mantiene, fijándose como objetivos principales para 2050 alcanzar la neutralidad climática con la reducción de al menos un 90% las emisiones de gases de efecto invernadero y conseguir un sistema eléctrico 100% renovable. Para ello, el gobierno de España ha tomado una serie de medidas con el objetivo de impulsar el uso de energías renovables, reduciendo al máximo la utilización de combustibles fósiles y promoviendo la movilidad sostenible, entre otros (Fig. 9). Para mejorar el *mix* energético y reducir la dependencia exterior, es necesario aumentar la inversión para llevar a cabo planes específicos de acción que impulsen el desarrollo e implantación de tecnologías en el ámbito de las energías renovables y la eficiencia energética.

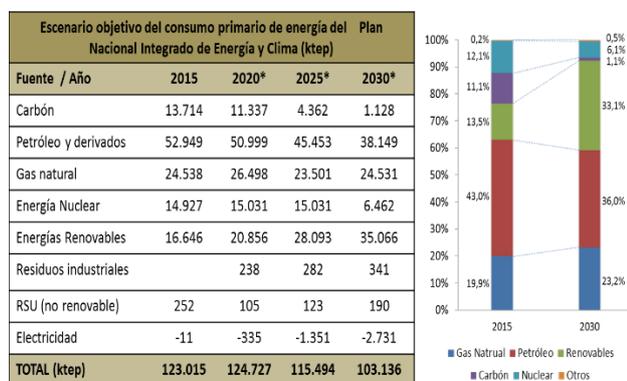


Fig 9. Consumo primario de energía, incluyendo usos no energéticos, en el escenario objetivo del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (Ministerio de Transición Ecológica, 2018).

En este contexto, el proyecto Matamulas cobra especial relevancia, ya que es el único proyecto europeo que podría comenzar su producción a corto plazo, abastecería una tercera parte de la demanda europea durante los próximos diez años y alberga un alto porcentaje de elementos críticos esenciales para la fabricación de numerosas tecnologías altamente demandadas.

PROYECTO MATAMULAS

El yacimiento Matamulas fue descubierto en los años 90 a raíz de las investigaciones sobre meta-areniscas de rutilo-zircón que llevó a cabo la empresa nacional ADARO en la zona del Campo de Montiel (Ciudad Real), bajo el Programa de Investigación Sistemática de Recursos Minerales (Proyecto: Zona Centro), cuyos resultados fueron recogidos en varios informes anuales durante el periodo en el que se prolongó el proyecto (ADARO, 1991, 1992). Tras la realización de una campaña regional mineralométrica, se localizó un valor extremadamente alto de fosfatos de TTRR en la Sierra de Cabeza de Buey, donde se manifestaba disperso en un depósito aluvial. Se trata de un depósito de tipo placer formado por un aluvión no consolidado de arenas y arcillas. Este aluvión alberga nódulos de monacita gris,

con forma redondeada, y un tamaño variable entre 0,2 y 2,0 mm (Fig. 10).

Entre 2013 y 2015, Quantum Minería solicitó cuatro permisos de investigación en esta zona, reanudando la exploración minera, en base a la información recopilada anteriormente, que culminó con la solicitud de tres concesiones de explotación derivadas de dos de los permisos.

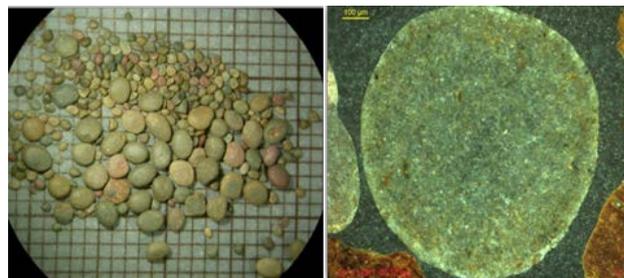


Fig 10. La imagen de la izquierda muestra los nódulos de monacita gris, sobre cuadrícula milimétrica, entre 0,2 y 2 mm de tamaño, con formas redondeadas y colores similares, que manifiestan la homogeneidad del fosfato de TTRR. La imagen de la derecha muestra el detalle de un nódulo de monacita al microscopio (barra escala: 100 micras), con recubrimiento micáceo que indica poco transporte antes del depósito. (Quantum Minería, 2016).

La monacita gris es el único mineral con interés económico del yacimiento, siendo un fosfato de TTRR procedente de las rocas paleozoicas meteorizadas. Su composición química, expresada como porcentaje en peso, es de 60% de óxidos de TTRR totales (TREO, por sus siglas en inglés, que representa la suma total de los diferentes REOs), 23 % de óxido de fósforo, 10% de óxido de silicio y 7% de óxidos de hierro.

La monacita gris del yacimiento Matamulas presenta un contenido insignificante de torio y uranio. Los resultados obtenidos de los análisis de radioactividad concluyen que el proyecto Matamulas no supone ningún tipo de riesgo radiológico, pues las dosis medidas en los concentrados de mineral indican valores de 0,22 mSv/año, cuando el valor medio mundial de radiación natural existente en el ambiente, según el Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas, (también conocido como UNSCEAR por sus siglas en inglés) es de 2,4 mSv/año, y el Consejo de Seguridad Nacional obliga a tomar medidas a partir de dosis superiores a 1 mSv/año.

Geología del yacimiento

Las unidades litológicas presentes en el entorno geológico del yacimiento Matamulas son la cuarcita armoricana y las alternancias de Pochico, hasta final del Arenig, transición de Pochico a pizarras negras de Calymene en el Llanvirn, transición a pizarras verdes (Llandeilo) y las alternancias superiores de pizarras, areniscas y cuarcitas hasta los bancos gruesos de cuarcita del Caradoc. Las formaciones existentes son, de más antigua a más moderna, cuarcita armoricana, alternancias

de Pochico, pizarras negras de Calymene y las alternancias superiores y cuarcitas de cantera (Instituto Geológico y Minero de España, 2004).

El esquema estructural básico constituye un gran anticlinal de eje aproximado este-oeste, ligeramente levantado hacia el norte en su parte más oriental. El núcleo de este anticlinal lo constituyen la cuarcita armoricana y la interfase superior de alternancias de Pochico. Los contactos con la serie siguiente, la pizarra negra de Corredera, son concordantes en los pocos sitios donde han podido ser observados. La estructura de esas pizarras, sin aparentes pliegues sobre sí misma, es de buzamiento bastante tendido, sin grandes alteraciones estructurales. El anticlinal se completa, tanto al norte como al sur, con la unidad de cuarcitas del Caradoc, con rumbos y buzamientos bastante normales al sur y algo más trastocada al norte, donde el contacto es, al menos en algún punto, tectónico, y alguna falla longitudinal con respecto al eje de la estructura altera las cuarcitas hasta colocarlas, en algún caso, con buzamiento sur en la vertiente norte (Kremenetski *et al.*, 1991).

Toda esta estructura está cortada por una familia de fallas nordestadas (N15°-30°W), que determina la morfología de la Sierra, según espacios y desplazamientos de componente vertical, que han sido definitivamente importantes en los modelos de erosión, arrastre y depósito de los materiales detríticos que hoy contienen monacitas liberadas en su matriz. Los sedimentos con más perspectivas respecto a los placeres de monacita son los de edad Neógeno-Pleistoceno, que se extienden en el piedemonte y en los antiguos valles (enterrados) que lo desmiembran, y en las depresiones de contraste.

El reconocimiento geológico llevado a cabo determinó un yacimiento de tipo placer donde la meteorización físico-química liberó nódulos de monacita gris de la roca primitiva, concentrándose el mineral a lo largo de una cuenca somera encajada entre dos relieves, depositándose como unidades detríticas cuaternarias. El depósito aluvial de época plio-cuaternaria descansa sobre pizarras aflorantes marginales del Paleozoico, al norte y al oeste de la Sierra de Cabeza de Buey, cuya altitud se encuentra en torno a los 800 m. El depósito económicamente explotable se adapta a un antiguo cauce, extendiéndose unos 9 km a lo largo del valle norte, con una anchura variable entre 500 m y 2 km, y con una potencia media de 2,5 metros de profundidad.

Trabajos realizados en el yacimiento

Durante los años siguientes, se excavaron más de 450 pozos nuevos en áreas históricamente muestreadas, con el objetivo de confirmar las estimaciones iniciales de recursos presentadas por ADARO. Los pozos se realizaron con un mallado regular de 150 m, cubriendo la totalidad de la longitud del antiguo cauce, y focalizándose sobre las áreas más favorables

identificadas anteriormente. Estos pozos de desmuestra se abrieron mediante retroexcavadora, con una profundidad variable, atravesando la totalidad del sedimento. Después de realizar una roza sobre una de las paredes del hueco, se tomaron las muestras 'metro a metro', desde el fondo de la calicata hasta la superficie. Una vez obtenidas las muestras de cada uno de los pozos excavados, éstas se cuartearon, cribaron y redujeron para su envío a un laboratorio homologado donde fueron analizadas químicamente. El propósito de esta fase fue delimitar y calificar los recursos y reservas de la zona. Posteriormente, en 2015, se realizó una nueva campaña de 612 pocillos sobre malla regular de 250 m y con una profundidad total excavada de 980 m, con la finalidad de estimar la ampliación de los recursos minerales del yacimiento en otras zonas de los permisos de investigación otorgados, que no habían sido exploradas hasta el momento (Fig. 11).

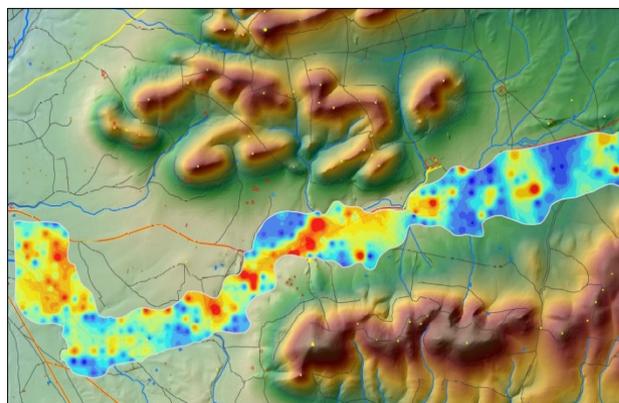


Fig 11. Mapa general del yacimiento con los resultados de la exploración y valoración llevada a cabo sobre los permisos de investigación Matamulas y Rematamulas en los términos municipales de Torrenueva y Torre de Juan Abad, Ciudad Real (escala: 1:20.000). Modelo digital de potencias por leyes (gr/m^2), donde las áreas de color rojo revelan valores mayores de ley, decreciendo según la gama de colores, hasta llegar a las zonas de color azul oscuro, con valores inferiores. (Quantum Minería, 2016).

También, durante este año, se realizaron ensayos mineralúrgicos sobre dos muestras compuestas obtenidas a partir de todos los pozos de reconocimiento del depósito, habiendo sido sometidas previamente a un proceso de tamizado en húmedo para obtener las fracciones granulométricas adecuadas. El estudio comprendió ensayos mineralúrgicos de separación en líquidos densos y concentración gravimétrica en mesas de sacudidas. También se realizaron varios ensayos hidrometalúrgicos, mediante vía ácida y cáustica, sobre los concentrados de monacita, concluyendo que ambas vías eran factibles, aunque se obtuvieron mejores recuperaciones por vía ácida, alcanzándose un 90%.

Resultados obtenidos

Se analizaron más de mil muestras de las calicatas realizadas y se obtuvo una distribución representativa de todos los elementos de TTRR presentes en el yacimiento, donde destaca la abundancia de Nd y Pr como elementos especialmente críticos. El porcentaje en

peso de los elementos de TTRR contenidos en los nódulos de monacita gris del yacimiento Matamulas se recoge en la Tabla 1.

La ₂ O ₃	17,52	CeO ₂	45,05	Pr ₈ O ₁₁	5,87
Nd ₂ O ₃	22,65	Sm ₂ O ₃	4,48	Eu ₂ O ₃	0,83
Gd ₂ O ₃	2,12	Tb ₄ O ₇	0,21	Dy ₂ O ₃	0,44
Ho ₂ O ₃	0,08	Er ₂ O ₃	0,03	Tm ₂ O ₃	0,05
Yb ₂ O ₃	0,05	Lu ₂ O ₃	0,00	Y ₂ O ₃	0,64
ThO ₂	0,18				

Tabla 1. Contenido medio (en porcentaje en peso) de los REOs presentes en los nódulos de monacita del yacimiento Matamulas (valor medio de todas las muestras analizadas).

Con los resultados obtenidos de los análisis de las muestras de las diferentes campañas ejecutadas, se realizó una estimación de recursos mediante un estudio preliminar de evaluación económica, bajo los estándares del código JORC (siglas en inglés de *Joint Ore Reserves Committee*). Se obtuvo un depósito de 29,9 millones de toneladas con una calificación de 0,101% de TREOs. Esta estimación da como resultado un depósito mineral de 30.207 toneladas de TREOs *in situ*.

Según los resultados de los análisis cuantitativos de liberación mineral realizados para alcanzar un mayor conocimiento sobre el mineral (Burrows, 2015), se determina que la monacita es el único mineral portador de los elementos de TTRR identificados en las muestras. Éstas fueron analizadas mediante un analizador de liberación mineral (MLA según sus siglas en inglés), que proporciona datos mineralógicos cuantitativos. La monacita aparece en las muestras como nódulos gruesos con un diámetro máximo que supera en un 80% las 1.100 µm. Se detecta en concentraciones de 1,04% en peso en las muestras individuales de mineral clasificado, y de 82,44% en peso en las muestras de concentrado. La composición de la monacita es variable, debido a la presencia de inclusiones de grano fino y diseminadas que no pudieron eliminarse completamente mediante el análisis por MLA. Para reflejar la naturaleza dominante de éstas inclusiones, se le asigna a los nódulos de monacita una composición promedio que incluye la presencia de K, Al, Fe y Si.

Por otro lado, de los estudios petrográficos realizados (Castroviejo, 2016), se determina que los nódulos de monacita presentes en las muestras individuales recogidas directamente del depósito no están liberados, mientras sí lo están, prácticamente al 100%, en las muestras del concentrado, pero incluyendo silicatos e impregnación limonítica (Fig. 12) en proporciones variables y difícilmente separables físicamente. Además, según el estudio mediante MLA, la ganga de las muestras individuales del depósito presenta concentraciones significativas de arcillas, calcita, clorita, moscovita, cuarzo e hidróxidos de Fe, mientras que la ganga del concentrado incluye concentraciones significativas de cuarzo, goethita, clorita y moscovita.

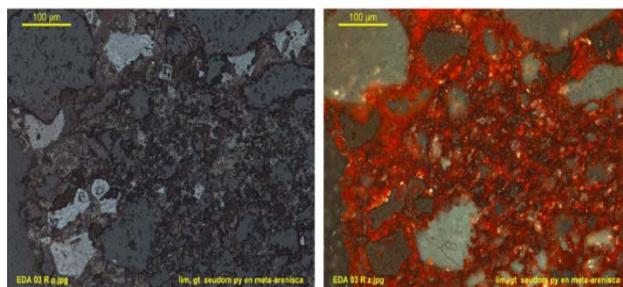


Fig 12. Fotomicrografías de la fracción desechada como estéril de las muestras analizadas (escala de la barra: 100 micras). Las dos imágenes son observaciones al microscopio petrográfico con luz reflejada. Ambas pertenecen al grupo de las meta-areniscas y muestran una notable impregnación limonítica con óxidos de Fe secundarios procedentes de la sustitución de fases sulfuradas de las que se conservan pseudomorfas, siendo más claros que los silicatos (izquierda: nicoles paralelos), y perceptibles las reflexiones internas rojizas (derecha: nicoles cruzados) (Castroviejo, 2016).

Por otra parte, tras un estudio experimental de evaluación cuantitativa de materiales mediante QEMSCAN, se concluyó que los nódulos de monacita relativamente grandes, aquellos con un diámetro superior a 1 mm, presentan una zonación bien definida, con una correlación inversa de Nd y Ce. En el caso del Nd, se enriquece en las partes centrales del nódulo (Fig. 13), mientras que el contenido en Ce aumenta en la dirección opuesta.

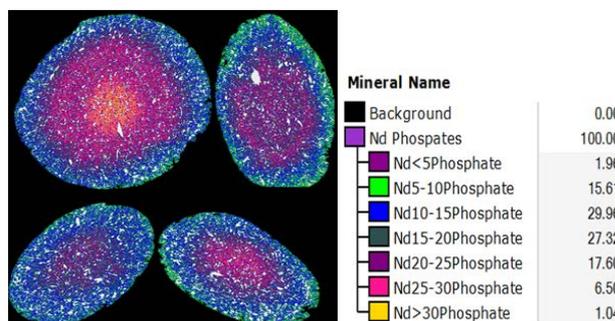


Fig 13. Imagen de nódulos de monacita tomada mediante QEMSCAN, en la que se observa la distribución de neodimio. El ancho del nódulo mayor es de 1.000 micras (Quantum Minería, 2016).

Tras todos los estudios llevados a cabo, se concluye que la ley del concentrado de monacita podría mejorarse del 0,2% al 40% solo por concentración física con métodos gravimétricos, de deslamado y cribado, obteniendo un concentrado de monacita pura con una recuperación mineral superior al 70%. Esto significa una disminución sustancial en los costes de operación y de capital en las fases siguientes de concentración química y extracción por solventes.

Método de explotación del yacimiento

En este yacimiento se prevé una explotación a cielo abierto durante 10 años, estableciendo una secuencia de extracción (con una profundidad media de 2,5 metros) que atenderá a la variación de las leyes y a la distancia entre la planta de tratamiento y la zona a explotar en cada fase, tal y como queda reflejado en los proyectos de

concesión de explotación presentados por la empresa ante el organismo competente.

Las áreas explotadas se restaurarán de forma simultánea a la explotación de otras zonas (minería de transferencia), minimizando, así, la superficie afectada en todo momento (Fig. 14). Como los terrenos que ocupan el proyecto Matamulas (234 hectáreas) están dedicados al cultivo, fundamentalmente cereal de secano, se realizaron estudios de caracterización edafológica del suelo y su interpretación agronómica, así como sobre la posible afección a la productividad agronómica por la extracción de monacita. Higuera *et al.* (2018) concluyen que ambas actividades son compatibles, resaltando las mejoras que podría suponer para el terreno en las futuras siembras, al no generar la minería ningún impacto negativo sobre la agricultura.



Fig 14. Secuencia de explotación del yacimiento en función de las concesiones solicitadas (localizadas en los términos municipales de Torrenueva y Torre de Juan Abad) y la ubicación de la planta de tratamiento (Advisian, 2017).

Las operaciones de arranque, carga, transporte y vertido en planta se llevarán a cabo con sistemas discontinuos. El arranque y la carga del material se realizarán mediante retroexcavadora y pala, mientras que las cintas transportadoras y un reducido número de camiones articulados serán los responsables de transportar el mineral y descargarlo sobre un acopio habilitado a la entrada de la planta de tratamiento. De esta manera, se minimizará, en gran medida, el impacto sobre la fauna, al permitir el tránsito natural de animales cuadrúpedos bajo las cintas transportadoras. Así mismo, se ha minimizado la posibilidad de creación de polvo en el transporte, carga y descarga del mineral y se ha disminuido significativamente el consumo de agua previsto, ya que al reducir el número de pistas de tránsito para camiones decrecen las necesidades de riego.

La planta de tratamiento prevista es de concentración gravimétrica y cuenta con dos grandes zonas: área de clasificación, deslamado y eliminación de arcillas, y área de concentración gravimétrica mediante espirales, mesas de sacudida y separación magnética (Duro Felguera, 2016). En la primera etapa de clasificación se retirará un 80% aproximadamente del material llegado de la mina, que será devuelto al hueco generado. El 20% restante del material total será enviado a la segunda área de la planta y, al ser los nódulos de monacita redondeados y más

densos que los estériles agregados, se obtendrá un concentrado comerciable mediante separación gravimétrica. Este tratamiento se llevará a cabo en dos fracciones granulométricas paralelas, pero se generará un único concentrado final de monacita. Al encontrarse la monacita en forma de nódulos libres y representar solamente un 1% de la masa inicial del yacimiento, el estéril resultante, tras el proceso de tratamiento, se acopiará a pie de planta, desde donde será transportado por cintas y camiones articulados de vuelta al yacimiento para su posterior restauración.

Restauración

La restauración del yacimiento se realizará de acuerdo a la propuesta de actuación de Higuera *et al.* (2016) con objeto de garantizar el mantenimiento del uso de cultivo herbáceo tradicional, una vez finalizado el proyecto minero.

Inicialmente se retirará la capa de suelo vegetal de los cuarteles de explotación con un grosor suficiente que permita el desarrollo de la raíz de los cultivos existentes en la situación preoperacional. Esta cobertura vegetal se acopiará temporalmente en las inmediaciones del cuartel correspondiente. El tiempo entre la retirada y posterior reposición de la capa será lo más corto posible, sin superar, en ningún caso, los tres meses. Esto queda garantizado por la elección del método de explotación, minería de transferencia, en el que la capa retirada pasa inmediatamente a recubrir zonas ya explotadas, minimizando así el tiempo que los huecos permanecen abiertos y la capa de tierra vegetal amontonada.

Los huecos de explotación serán rellenados con los estériles provenientes de la planta de tratamiento, evitando problemas de compactación, discontinuidades texturales violentas, falta de conductividad hidráulica, etc. A continuación, se extenderá la tierra vegetal acopiada, y se añadirá materia orgánica a la capa superficial para mejorar su estructura y fertilidad. Posteriormente, y cada tres años, se realizarán labores de subsolado para romper la suela de labor y la discontinuidad edáfica. Esta labor se realizará a la profundidad adecuada y garantizando que no se mezclen los horizontes. Por todo lo anterior, la restauración proyectada con fines agronómicos del suelo no tendrá ninguna incidencia negativa en la calidad y productividad biológica del suelo.

CONCLUSIONES

El proyecto Matamulas sería la primera explotación minera europea con capacidad de puesta en marcha a corto plazo. Este depósito alberga un alto porcentaje en peso de Nd y Pr y un contenido insignificante de elementos radiactivos. Además, tiene una minería sencilla donde no se requieren aditivos ni escombreras.

Es un proyecto crítico porque los metales que se obtén-

drían son vitales para la industria moderna y el desarrollo de energías limpias (aerogeneradores y coches eléctricos e híbridos). Asimismo, es un proyecto estratégico para la Unión Europea porque minimizaría la dependencia con respecto a China, suministrando el 32% de la demanda europea de TTRR durante los 10 años de vida útil del proyecto.

El proyecto Matamulas supondría una mejora en las condiciones socioeconómicas del Campo de Montiel, con beneficios tales como creación de empleo, programas de formación y capacitación y dinamización de las poblaciones cercanas. En este sentido, está prevista la creación de 154 puestos de trabajo directos, con un efecto multiplicador de unos tres puestos de trabajo indirectos por cada puesto directo creado. Esto conllevaría un aumento general en la renta disponible de los habitantes de la zona y la aparición de nuevas empresas que realicen actividades operativas vinculadas al proyecto minero. De esta forma, se incrementaría la actividad económica local de la zona, creando riqueza sin impactar negativamente en otras actividades económicas ya presentes.

Igualmente, se han previsto una serie de medidas preventivas, correctoras y compensatorias, tanto a nivel ambiental como socioeconómico, que serán el referente para el control, subsanación y mejora de todos aquellos factores sobre los que pueda incidir el proyecto minero. Así mismo, la empresa implantará adecuadamente la Gestión Minera Sostenible permitiendo un control externo del proyecto, que contribuya a mejorar la gestión, la percepción social, y aumente la implicación del entorno socioeconómico de las explotaciones.

Con todo ello, Quantum Minería considera que este proyecto es clave para fomentar el desarrollo industrial de la región, promover el crecimiento socioeconómico de la Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha, y posicionar a España como líder europeo en la producción de estos minerales.

REFERENCIAS

Advisian (2017): Estudio de impacto ambiental. Proyecto de explotación de las Concesiones Matamulas y Rematamulas Fracciones 1ª y 2ª (Ciudad Real). Informe científico-técnico (no publicado). 81 p. (más anexos).

ADARO (1991): Programa de investigación sistemática de recursos minerales. Proyecto: Zona Centro. Actuación en Cabeza de Buey (Fase II Monacitas). Informe de trabajos de 1990. Informe científico-técnico (no publicado). 130 p.

— (1992): Programa de investigación sistemática de recursos minerales. Proyecto: Zona Centro. Actuación en Cabeza de Buey (Fase II Monacitas). Informe de trabajos de 1991. Informe científico-técnico (no publicado). 235 p (tomo I) y 233 p (tomo II).

Burnotte, E., Pirard, E., Michel, G. (1989): Genesis of grey monazites; evidence from the Paleozoic of Belgium. *Econ Geol*, **84**, 1417-1429. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.84.5.1417>

Burrows, D. (2015): J0171 MLA analysis of phosphate REE ore and concentrate samples - Preliminary report. Australian Laboratory Services Pty Ltd. Informe interno (no publicado). 30 p.

British Geological Survey (2017): Map of European REE deposits and occurrences 2017 BGS © UKRI. EURARE Project. <http://www.eurare.eu/> [consulta: 30 mayo 2019].

Castilloux, R. (2017): Rare earth market outlook: supply, demand and pricing. Adamas Intelligence Ltd. 23 p.

— (2018): Spotlight on dysprosium. Revving up for rising demand. Adamas Intelligence Ltd. 37 p. <https://www.adamasintel.com/> [consulta: 20 mayo 2019].

Castroviejo, R. (2016): Estudio microscópico y caracterización mineralógica de concentrados, mixtos y estériles. Depósitos monacíticos de Matamulas (Ciudad Real). Laboratorio de Microscopía Aplicada (LMA) de la Universidad Politécnica de Madrid. Informe interno (no publicado). 63 p.

Chalmers, I. & MacDonald, A. (2017): Economics of rare earth projects. Alkane Resources Ltd, 19 p. <https://www.asx.com.au/asxpdf/20171012/pdf/43n5093j6r7rbl.pdf> [consulta: 30 mayo 2019].

Duro Felguera, S.A. (2016): Proyecto de explotación para el depósito mineral Matamulas. Informe interno (no publicado). 105 p.

EURARE Partners (2017): Research and development for the rare earth element supply chain in Europe. Eurare. 40 p. http://www.eurare.eu/docs/EURAREbrochure_vfinal.pdf [consulta: 23 mayo 2019].

Haque, N., Hughes, A., Lim, S., Vernon, C. (2014): Rare earth elements: overview of mining, mineralogy, uses, sustainability and environmental impact. *Resources*, **3(4)**, 614-635. <https://doi.org/10.3390/resources3040614> [consulta: 19 mayo 2019].

Higueras, P., García, F.J., Amorós, J.A., Pérez, C., Esbrí, J.M., (2016): Caracterización edafológica y agronómica del suelo en el proyecto de explotación Matamulas. Instituto de Geología Aplicada de la Universidad de Castilla-La Mancha. Informe científico-técnico (no publicado). 59 p.

—, García, E., Campos, J.A., Esbrí, J.M., García, F.J., Álvarez, R., Jiménez, R. (2018): Estudio de la posible afección a la productividad agronómica por la extracción de monacita (Campo de Montiel, Ciudad Real). Instituto de Geología Aplicada de la Universidad de Castilla-La Mancha. Informe científico-técnico (no publicado). 36 p.

Instituto Geológico y Minero de España (2004): Mapa geológico de España. Escala 1:50.000. Segunda serie - Primera Edición. Hoja 838/20-33. Santa Cruz de Mudela. <http://info.igme.es/cartografiadigital/datos/magna50>

- /memorias/MMagna0838.pdf [consulta: 16 junio 2019].
- KITCO (2019): Strategic metals. <https://www.kitco.com/strategic-metals/> [consulta: 12 junio 2019].
- Kremenetski, A., Potapova, G., Veremeeva, L. (1991): Investigaciones mineralométrico-geoquímicas y estructural-geomorfológicas de las rocas primarias que contienen monacita y de placeres de la región de Navas de Estena (España). Informe sobre los trabajos de la I-Ka fase de MAYASA e IMGRE de 1990-1991. Informe científico-técnico (no publicado).
- Ministerio de Transición Ecológica (2019): Borrador del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030. 286 p. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/spain_draftnecp.pdf [consulta: 29 abril 2019].
- Mining Technology (2015): Mountain Pass Rare Earth Mine modernisation project, California <https://www.mining-technology.com/projects/mountain-pass-rare-earth-mine-modernisation-project-california/> [consulta: 20 abril 2019].
- Quantum Minería S.L. (2016): Proyecto de explotación. Concesión de explotación Matamulas nº 12.919-10; Concesión de explotación Rematamulas Fracción 1ª, nº 12.920-10; y Concesión de explotación Rematamulas Fracción 2ª, nº 12.920-20. Informe interno (no publicado). 108 p. (más anexos).
- United States Geological Survey (USGS) (2019): Rare earths statistics and information. Mineral commodity summaries from 2012 to 2018. <https://www.usgs.gov/centers/nmic/rare-earths-statistics-and-information> [consulta: 30 abril 2019].



Sociedad Española de Mineralogía
Museo Geominero del Instituto Geológico
y Minero de España
c/ Calle de Ríos Rosas, 23
28003 Madrid

SEM

Organizadores:



UNIVERSIDAD
DE GRANADA