

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.

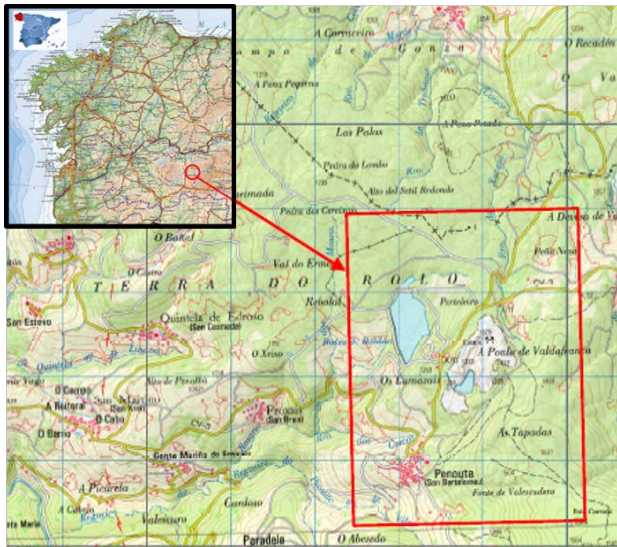


Fig 1. Localización del proyecto de la mina de Penouta (elaborado a partir de información del Instituto Geográfico Nacional, <https://www.ign.es/web/ign/portal>).

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).

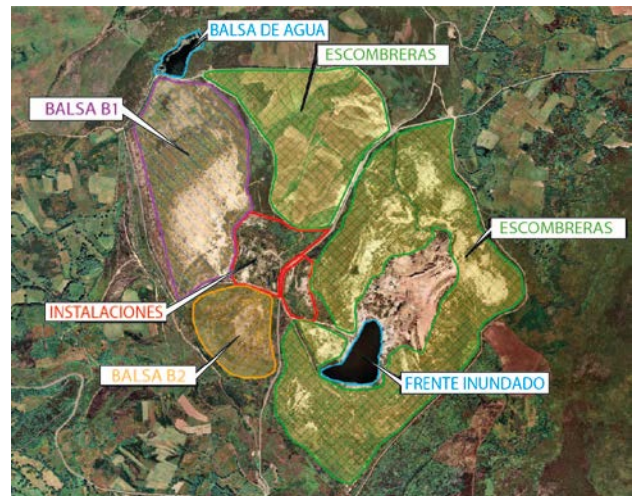


Fig 2 Distribución de las diferentes zonas de explotación de la Sección B de la mina de Penouta (elaborado a partir de información del Instituto Geográfico Nacional, <https://www.ign.es/web/ign/portal>).

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 pegmatíticos bandeados en la zona apical de la cúpula

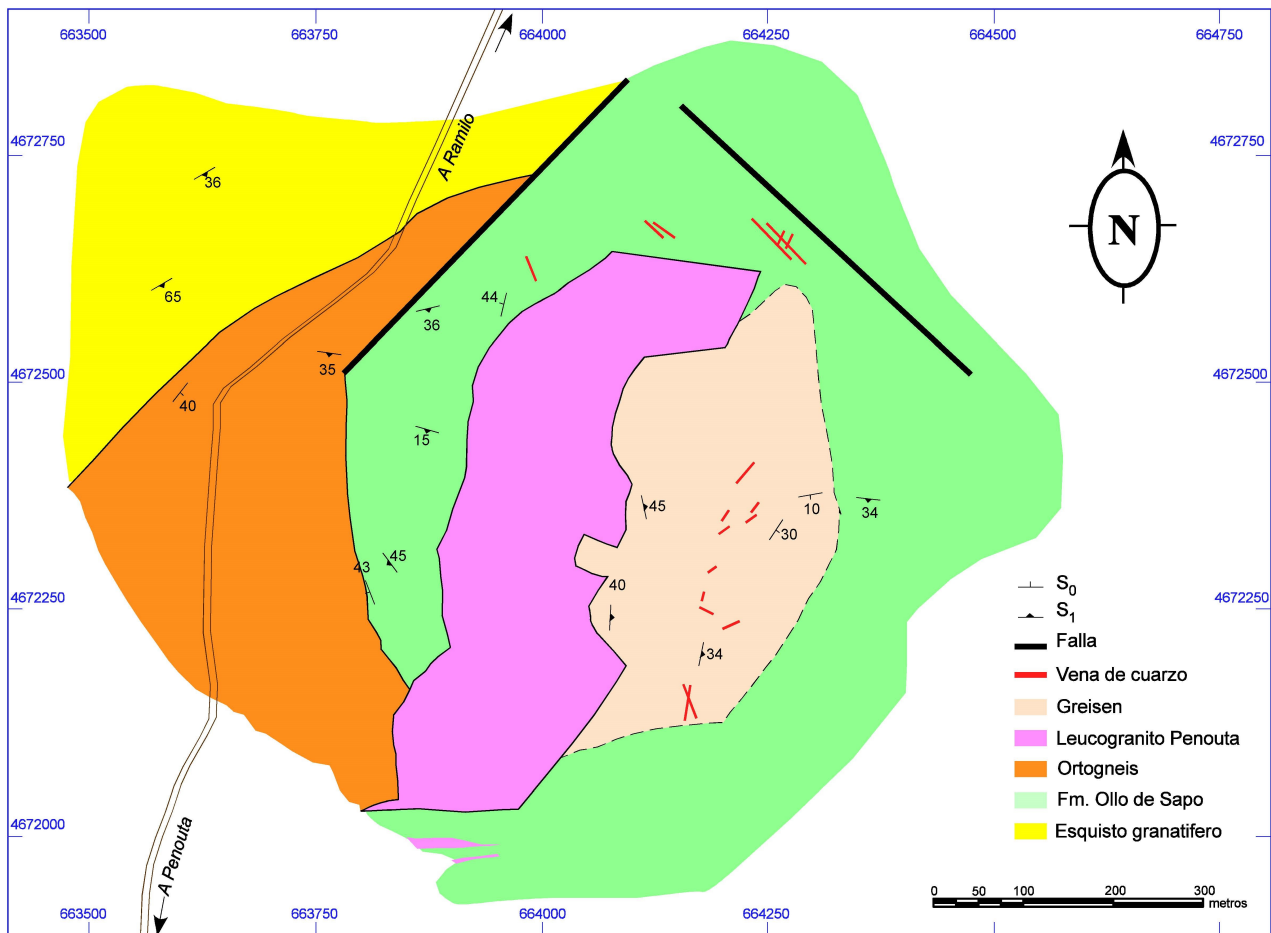


Fig 3. Mapa geológico del granito de Penouta. Modificado de López Moro et al (2017).

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.

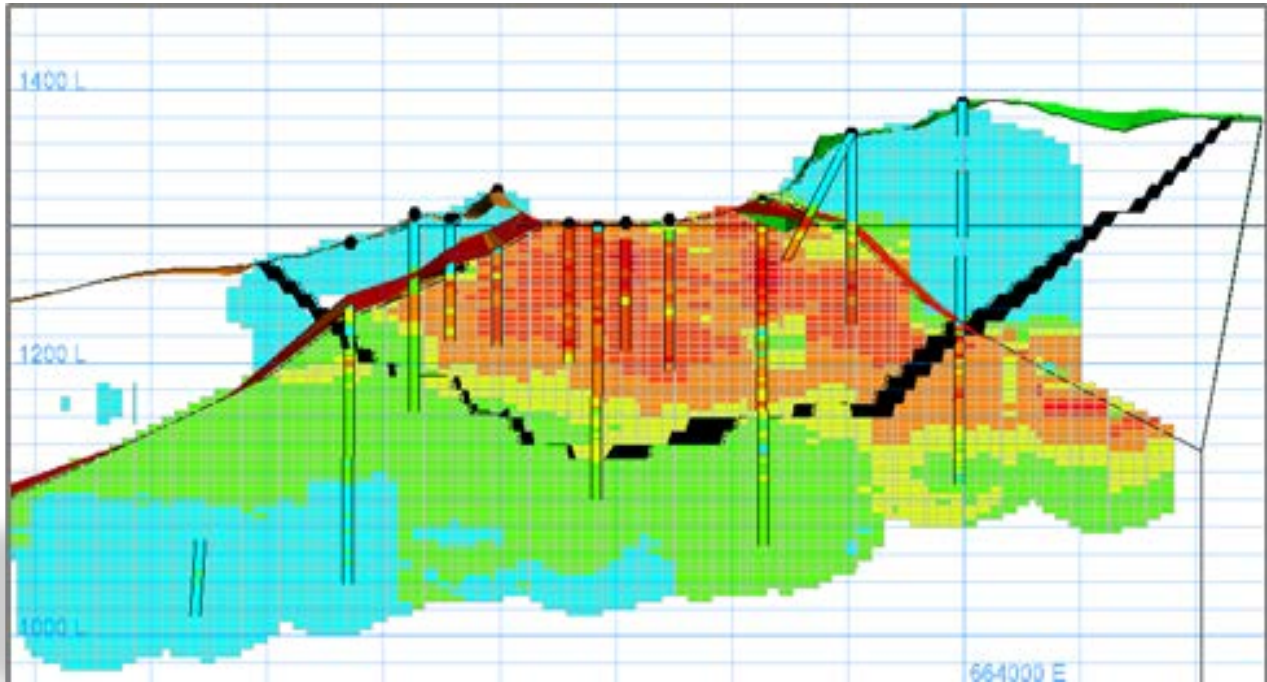


Fig 4. Modelización de recursos de tantalio en el leucogranito de la sección C. Leyenda: azul 0-35 ppm; verde 35-65 ppm; amarillo 65-80 ppm; naranja 80-100 ppm; rojo >100 ppm (información interna, publicada con la autorización de Strategic Minerals Spain, S.L.)

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 molienda. 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.

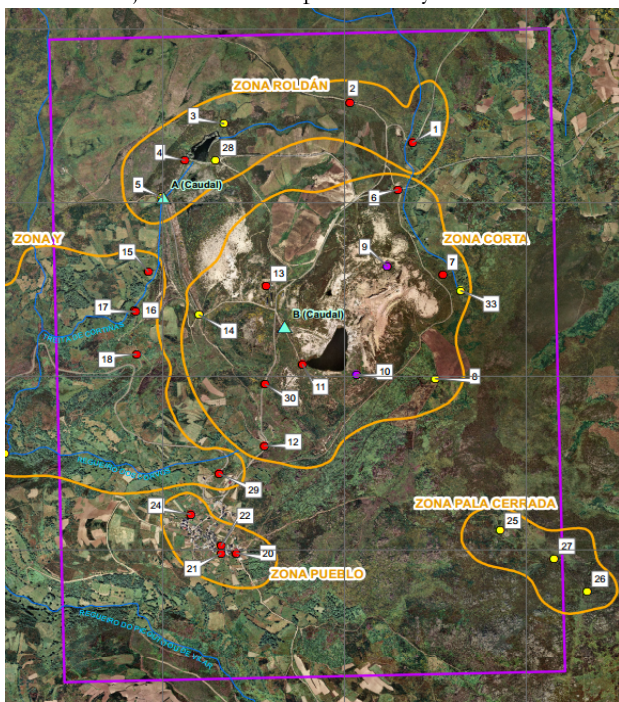


Fig 7. Ubicación de algunos puntos de revisión medio ambiental (elaborado a partir de información del Instituto Geográfico Nacional, <https://www.ign.es/web/ign/portal>).

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).

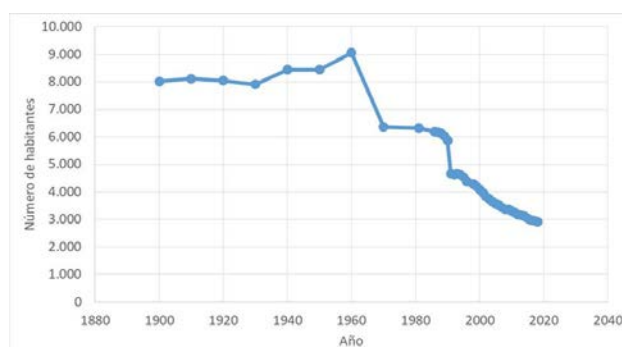


Fig 8. Evolución de la población en el Concello de Viana do Bolo, donde se observa el continuo descenso de los habitantes desde el cierre de la mina en los años 80 (datos tomados del Instituto Nacional de Estadística, <https://www.ine.es/>).

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).

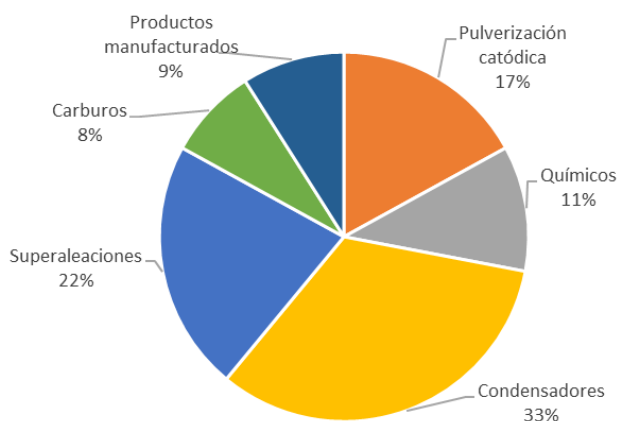


Fig 9. Aplicaciones principales del tantalio (Roskill, 2016; European Commission, 2017).

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.

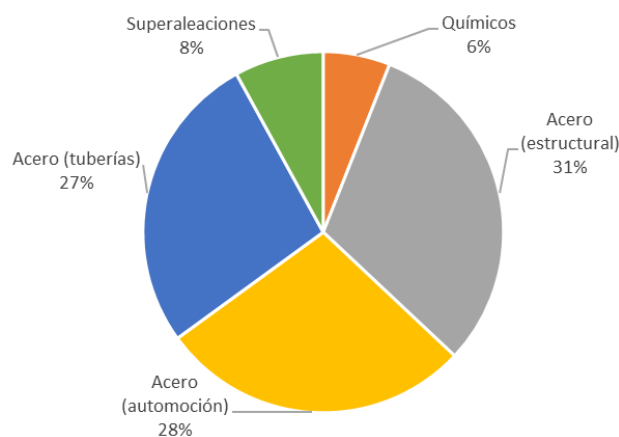


Fig 10. Aplicaciones principales del niobio (European Commission, 2017).

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

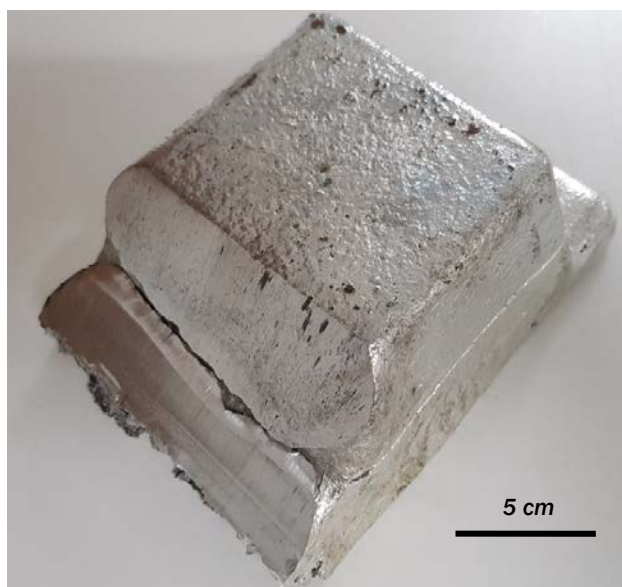


Fig 11. Fragmento de lingote de estaño.

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.