

Revisión sobre la producción, usos y revalorización de escorias

Review of the production, uses and revaluation of slag

Danay Alexandra Charles^{1*}, Adrián Amilcare González-Ibarra¹, Gloria Ivone Dávila-Pulido¹, Armando Salinas-Rodríguez², Blanca Rosa González-Bonilla¹

¹Escuela Superior de Ingeniería, Universidad Autónoma de Coahuila, Boulevard Adolfo López Mateos s/n. Nueva Rosita, Coahuila, México, C. P. 26800.

²CINVESTAV Unidad Saltillo, Avenida Industria Metalúrgica #1062, Parque Industrial Saltillo-Ramos Arizpe, Ramos Arizpe, Coahuila, México, C. P. 25900.

*E-mail: d_charles@uadec.edu.mx, (0000-0003-3016-6338)

Resumen

Los residuos sólidos de los procesos pirometalúrgicos conocidos como “escorias” son de naturaleza y características muy variadas; sus características dependen de su origen (materia prima de la que provienen), composición química y propiedades físicas. Asimismo, las escorias son de gran interés debido a las restricciones medioambientales actuales y a las aplicaciones emergentes, resultado de la necesidad de ser más competitivos sin comprometer al entorno.

De acuerdo con la bibliografía las escorias contienen elementos o compuestos de valor comercial, principalmente metales básicos y preciosos. El uso más común es como material para la construcción de caminos, pero también se ha reportado su uso como materia prima en la producción de cemento Portland, reemplazando parcialmente el Clinker.

Las escorias también se utilizan comúnmente como abrasivos en la limpieza de superficies. Además, éstas se utilizan como material de relleno para la estabilización de suelos (previa aglomeración), así como en la producción de materiales para la construcción como bloques de concreto y ladrillos.

Otra razón por la que las escorias han adquirido interés es por su contenido de metales como el cobre, oro, plata, níquel, manganeso, zinc y cobalto. Dicho lo anterior, es necesario plantear alternativas para la revalorización de escorias, ya sea mediante su uso por otra industria o mediante la extracción de los valores metálicos que contiene. Para lograrlo se deben implementar procesos de reducción de tamaño, aglomeración, concentración y/o extracción de metales.

La finalidad de esta revisión es brindar información para elucidar aspectos teóricos esenciales durante el procesamiento metalúrgico de escorias. Por lo que se abordan aspectos generales y se considera la implementación de la cianuración como una alternativa viable de revalorización de escorias. Además, se presentan algunos de los desafíos en la extracción de metales preciosos a partir de estos residuos, así

como el impacto medioambiental que el procesamiento puede generar. Se concluye que la extracción de metales preciosos a partir de residuos como las escorias es compleja, ya que se requiere una comprensión a fondo de las reacciones químicas y de la naturaleza física y química del residuo, sin embargo, es una etapa clave para transitar a una economía circular.

Palabras claves: Metales preciosos, Escoria, Residuo, Medioambiente.

Abstract

The solid waste from pyrometallurgical processes known as “slag” is of very varied nature and characteristics; Their characteristics depend on their origin (raw material from which they come), chemical composition and physical properties. Likewise, slags are of great interest due to current environmental restrictions and emerging applications, a result of the need to be more competitive without compromising the environment.

According to the literature, slag contains elements or compounds of commercial value, mainly base and precious metals. The most common use is as a material for road construction, but its use as a raw material in the production of Portland cement has also been reported, partially replacing Clinker.

Slags are also commonly used as abrasives in surface cleaning. In addition, they are used as filler material for soil stabilization (after agglomeration), as well as in the production of construction materials such as concrete blocks and bricks.

Another reason why slags have gained interest is because of their content of metals such as copper, gold, silver, nickel, manganese, zinc, and cobalt. Having said the above, it is necessary to propose alternatives for the revaluation of slag, either through its use by another industry or through the extraction of the metallic values it

contains. To achieve this, processes of size reduction, agglomeration, concentration and/or metal extraction must be implemented.

The purpose of this review is to provide information to elucidate essential theoretical aspects during metallurgical processing of slags. Therefore, general aspects are addressed, and the implementation of cyanidation is considered as a viable alternative for slag revaluation. In addition, some of the challenges in extracting precious metals from these wastes are presented, as well as the environmental impact that processing can generate. It is concluded that the extraction of precious metals from waste such as slag is complex, since a thorough understanding of the chemical reactions and the physical and chemical nature of the waste is required, however, it is a key stage to move to a circular economy.

Key words: Precious metals, Slag, Residue, Environment.

Introducción

La demanda de metales preciosos ha generado un incremento en los proyectos de exploración que incluyen yacimientos de baja ley y, como consecuencia, la implementación de nuevas tecnologías que conducen a la eficiencia productiva. Dependiendo de las características físicas y químicas del yacimiento se aplican diferentes métodos de procesamiento. Por lo regular, los minerales se someten a procesos a reducción de tamaño y se tratan metalúrgicamente en función de sus características inherentes (Reith y col., 2012). Además de los yacimientos de minerales metálicos, otros residuos de la industria minero-metalúrgica, particularmente las escorias, también pueden ser considerados como fuentes viables de metales.

La recuperación de metales valiosos a partir de los residuos de procesos metalúrgicos es complicada, sobre todo si los elementos de interés se encuentran

presentes en concentraciones muy bajas y formando especies complejas (Rai y col., 2021). Incluso, para algunos tipos de residuos minero-metalúrgicos no se tiene la certeza de la forma en la que se encuentran los elementos de valor económico. Por ello es importante desarrollar procesos de recuperación selectivos/específicos para cada tipo de residuo. Además, los procesos propuestos deben conseguir que los elementos no deseados (especies por las que no hay un interés económico) permanezcan en el residuo formando especies termodinámicamente estables (Kinnunen y col., 2022).

Diversos investigadores han emprendido estudios con el objetivo de proponer nuevos usos para los diferentes tipos de escorias de los procesos pirometalúrgicos. En el caso de la industria siderúrgica, las escorias producidas durante la fabricación de acero se reciclan en diversos procesos industriales o se utilizan en la fabricación de cemento Portland o materiales cerámicos (Panesar, 2019).

En menor medida, las escorias de los procesos pirometalúrgicos del cobre también se usan en el sector de la construcción o se procesan para obtener los metales que pueden contener, principalmente cobre (Acosta y col., 2001; Muller y col., 2002; Mills y col., 2011; Kanari y col., 1999; Shi y col., 2008). Se estima que por cada tonelada de cobre producido se producen 2.2 toneladas de escoria, estos son números relevantes para los principales productores de cobre mediante procesos pirometalúrgicos como Chile (Sánchez y col., 2004). Son pocos los estudios orientados a recuperar los metales preciosos a partir de estos materiales, aunque para el sector minero pequeño y mediano puede ser de gran interés comercial (Gamboa-Hernández y col., 2018).

La cianuración es uno de los procesos más utilizados para extraer oro y plata a partir de sus minerales y también es el más conocido en términos cinéticos y termodinámicos (González-Ibarra y col., 2016). Cuando se implementan adecuadamente los procesos de destrucción de cianuro se logra nulificar el riesgo

medioambiental y esto convierte al proceso de cianuración en uno de los más confiables. La industria minera de los metales preciosos utiliza aproximadamente 18% de la producción mundial de cianuro para extraer oro y plata de los minerales que los contiene (Bas y col., 2017). Dicho lo anterior, evaluar la extracción de los metales preciosos contenidos en escorias de procesos metalúrgicos mediante cianuración resultaría lógico como una primera etapa, pero para esto se requiere de una revisión amplia de las características físicas y químicas de las escorias y de los procesos mediante los cuales se obtienen.

En esta revisión se aborda la generación, clasificación, principales usos y revalorización de las escorias. Se discute como ruta de procesamiento la cianuración para la revalorización de escorias con contenidos de oro y plata. Asimismo, se presentan algunos de los desafíos en la extracción de metales preciosos a partir de estos residuos, así como el impacto medioambiental que el procesamiento puede generar. El objetivo principal es brindar información para elucidar aspectos teóricos esenciales durante el procesamiento metalúrgico de escorias.

Generación de Escorias

La producción de escorias está asociada a los procesos pirometalúrgicos, que se caracterizan por utilizar altas temperaturas para obtener los metales asociados a los minerales (Cui y Roven, 2011). Las escorias son residuos sólidos que se generan como resultado de procesos pirometalúrgicos y su origen está vinculado a la presencia de impurezas y elementos no deseados que se encuentran en la mena o ganga de los yacimientos minerales explotados.

La formación de escorias implica una serie de reacciones químicas complejas. Las escorias se componen principalmente de óxidos y otros compuestos, y su composición química puede variar ampliamente dependiendo de las características del mineral. Durante la tostación, las impurezas presentes en el mineral se oxidan

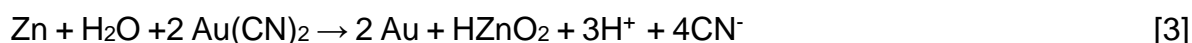
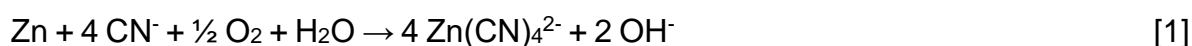
para convertirse en óxidos. Estos óxidos luego reaccionan con los fundentes (e.g., cal o sílice), para formar silicatos y otros compuestos (Wang, 2016; Sarfo y col., 2017).

Las características generales de una escoria del proceso pirometalúrgico para la obtención de cobre son las siguientes: apariencia vítrea, gravedad específica de entre 2.8 y 3.8, conductividad de 500 $\mu\text{s}/\text{cm}$, humedad menor al 5% y dureza de entre 6 y 7 en la escala de Mohs. La composición química de las escorias puede ser muy variada, pero es común que incluyan Fe, SiO_2 , CaO, MgO, Cu, Al_2O_3 , Mn y Zn (Sánchez y col., 2004).

Las escorias que son resultado de la fusión de los precipitados de Merrill Crowe para la obtención de metales preciosos en forma de lingotes conocidos como “doré” incluyen una serie de operaciones unitarias como las que se observan en la Figura 1.

Una vez que el mineral es cianurado, el lixiviado se almacena previo a su clarificación. Posteriormente el lixiviado se filtra para clarificarlo por lo que se alimenta a un tanque desoxigenador y se conduce al proceso de precipitación de metales preciosos mediante la adición de polvo de zinc.

El proceso de precipitación de metales preciosos con polvo de zinc es un proceso electroquímico, proviniendo por reacciones anódicas y catódicas localizadas (Vilchis-Carbajal y col., 2000). Las principales reacciones para la disolución del zinc se presentan en las ecuaciones 1-3.



Es necesario conocer los efectos de las concentraciones de cianuro, oxígeno y nitrato de plomo y el pH sobre la solubilidad del zinc para comprender mejor los fenómenos que controlan la eficiencia del zinc en estos sistemas (Chi y col., 1997).

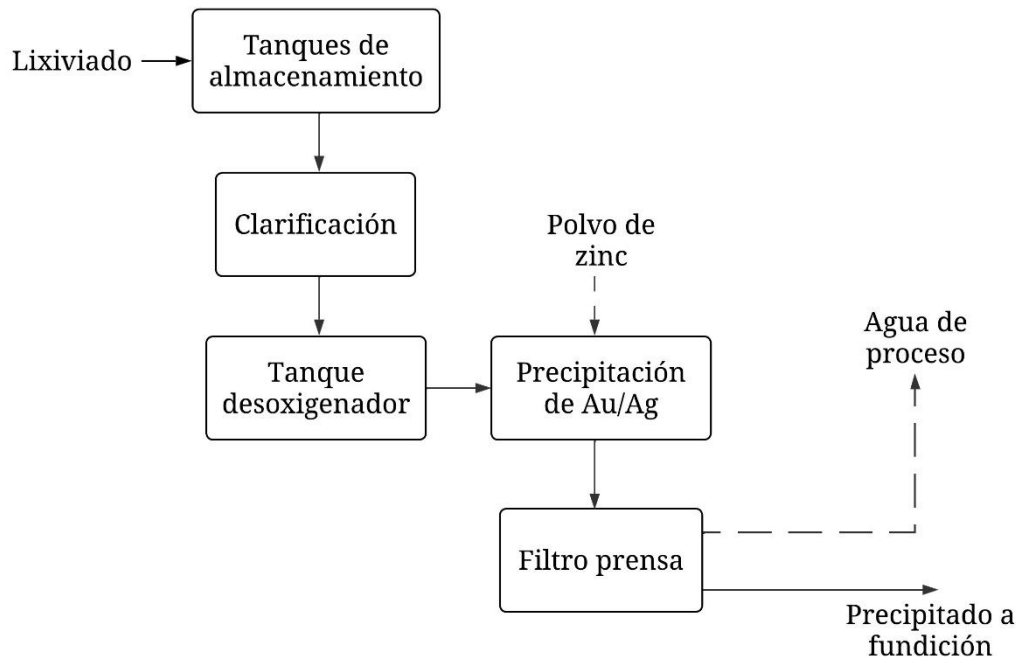


Figura 1.- Diagrama de flujo simplificado del proceso de precipitación de metales preciosos con polvo de zinc para la producción de doré (modificado de Gamboa-Hernández y col. (2018)).

Se ha reportado que una escoria generada mediante el proceso descrito en la Figura 1 puede contener sulfuro de plata, óxidos de hierro, dióxido de silicio, silicatos de sodio y zinc, etc., dependiendo de la naturaleza de la mena y de los fundentes que se utilicen en el proceso (Gamboa-Hernández y col., 2018).

En algunos casos las escorias pueden tener propiedades útiles que las hacen aptas para la fabricación de cemento o agregados para la construcción (Li y col., 2021). Sin embargo, en otros casos, las escorias pueden contener elementos tóxicos, por

lo que es necesaria su neutralización para después mezclarla con asfalto (Sánchez y col., 2004).

Para lograr minimizar el impacto al medio ambiente es necesaria la gestión adecuada de las escorias que se producen por los procesos pirometalúrgicos. Esto implica el diseño de procesos para el tratamiento físico o químico de escorias, la implementación de sistemas para el monitoreo de las áreas en las que se almacenan estos residuos y la adopción de nuevos enfoques de gestión como el de “Desarrollo Total del Proyecto” (TPD, por sus siglas en inglés) (Sánchez y col., 2004).

Clasificación de las Escorias y sus Principales Usos

Existen diversas formas de clasificar a las escorias, pero por lo regular se hace en función de factores como el proceso mediante el cual se producen, composición química, textura y/o usos. De acuerdo con la NOM-157-SEMARNAT-2009, que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros, las escorias se clasifican en función de los procesos de obtención, por lo que las escorias se agrupan dentro de los residuos de los procesos pirometalúrgicos de acuerdo con la Figura 2.

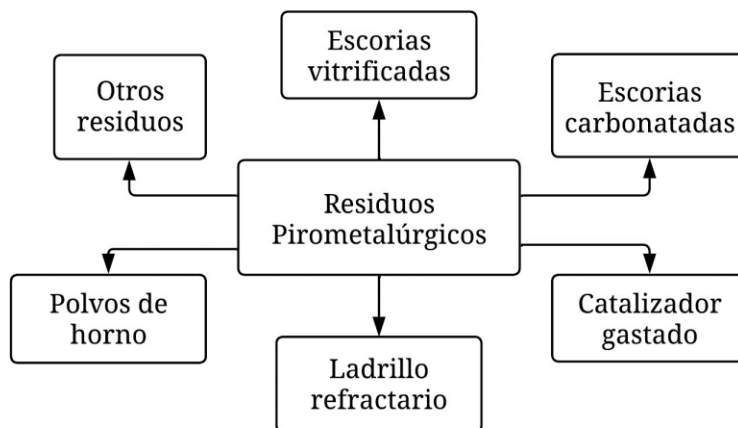


Figura 2.- Clasificación de los residuos pirometalúrgicos de acuerdo con la **NOM-157-SEMARNAT-2009**.

Se denominan escorias vitrificadas, al material solidificado que se extrae del gasificador. La vitrificación se utiliza en la eliminación y el almacenamiento a largo plazo de desechos nucleares u otros residuos peligrosos (Yung-Chin y col., 2016).

La vitrificación es la formación de vidrio mediante la fusión de silicatos en la estructura atómica amorfa asociada con el vidrio (Chen y col., 2018). A medida que el material formado se calienta en el horno, el componente de arcilla se convierte en cantidades cada vez mayores de vidrio (Chu y col., 2018).

Las escorias o materiales vitrificados son desechos de los procesos a alta temperatura que se solidifican mediante un enfriamiento rápido. Estas escorias contienen una mezcla de óxidos metálicos y no metálicos que han fundido juntos y luego se han enfriado rápidamente para formar un vidrio o un material similar (Tzen-Chin y col., 2008).

Debido a las propiedades que tienen las escorias vitrificadas, son adecuadas para diversos usos. La dureza que presentan las hace útiles para la construcción de carreteras y ferrocarriles, así como para la producción de materiales de construcción como bloques y ladrillos (Tzen-Chin y col., 2008). Además, son resistentes a la erosión y al desgaste, lo que las hace aptas para su uso como relleno en la construcción de presas y embalses.

Otra ventaja de las escorias vitrificadas es que son inertes y no tóxicas, lo que las hace seguras para el medio ambiente y para su uso en la agricultura como fertilizante (Souza y col., 2010). Además, su uso ayuda a reducir la cantidad de residuos que se generan en los procesos de fundición y otras industrias.

Las escorias carbonatadas provienen de los procesos para la obtención de hierro y fabricación acero. Como su nombre lo indica, estas escorias se caracterizan por su

alto contenido de carbonatos; dichos carbonatos se forman cuando los gases de combustión se mezclan con el óxido de calcio presente en la escoria (Puertas, 1995). A diferencia de las escorias vitrificadas, las escorias carbonatadas son menos duras y más porosas, lo que las hace más adecuadas para su uso en aplicaciones donde se requiere una mayor capacidad de absorción y filtración (Liu y col., 2021).

Desde el punto de vista ambiental, las escorias carbonatadas se consideran menos contaminantes que las escorias vitrificadas, ya que no contienen metales pesados ni otros contaminantes tóxicos (Santacruz-Torres y Torres-Agredo, 2019). Además, el uso secundario de estas escorias puede reducir la cantidad de residuos generados por la industria del acero que se tiene que almacenar y contribuir a la economía circular.

De acuerdo con diversos autores las escorias se pueden clasificar por el tratamiento al que se sometan, por lo que estas pueden ser escorias cristalizadas, granuladas, peletizadas o expandidas (Zhang y col., 2022; Yuskel, 2018; Douglas y Zerbino, 1986; Pan y col., 2020).

Las escorias cristalizadas son escorias que se han enfriado y solidificado lentamente, lo que permite la formación de cristales. Debido a su alta resistencia y durabilidad, se utilizan comúnmente como material de construcción (Zhang y col., 2022). Por otra parte, las escorias granuladas son escorias que se han enfriado rápidamente en agua o vapor, lo que las hace más porosas y menos densas (Yuskel, 2018). Se utilizan comúnmente como árido para la fabricación de concreto y otros materiales de construcción.

A diferencia de estos dos tipos de escorias, las escorias peletizadas son escorias que se han granulado y se han sometido a un proceso de aglomeración para formar pellets (Douglas y Zerbino, 1986). Estos pellets se utilizan comúnmente como material de relleno en la construcción y para la fabricación de cemento. Las escorias

expandidas son escorias que se han sometido a un proceso de expansión térmica, lo que las hace más ligeras y porosas (Pan y col., 2020).

Debido a la alta resistencia y durabilidad que presentan las escorias, el principal uso se centra en la construcción de carreteras. Se utilizan comúnmente como agregado en la construcción de bases y subbases de carreteras (Pasetto y Baldo, 2010). Además, su textura porosa permite un buen drenaje, lo que previene la acumulación de agua en las carreteras (Wang, 2016).

Es importante destacar que la disposición adecuada de las escorias es esencial para minimizar su impacto ambiental (Liu y col., 2021). Afortunadamente, las compañías que las producen han implementado prácticas de gestión de residuos responsables, incluyendo la recuperación y el reciclaje. Esto no solo reduce la cantidad de residuos que se envían a los depósitos de almacenamiento, sino que también puede proporcionar una fuente adicional de ingresos para la empresa.

Para el uso de las escorias en la industria de la construcción, los beneficios derivados de la utilización incluyen aspectos de ingeniería, ambientales y económicos (Wang, 2016; Liu y col., 2021). Si el producto final está en estado sólido, es ambientalmente aceptable y económicamente viable, existirán beneficios simultáneos y habrá un potencial para el uso de la escoria. Lo anterior se representa mediante la Figura 3; el área de intersección (color negro) representa el mayor potencial para el aprovechamiento de la escoria.

Antes de evaluar alguna de las vías para el uso de una escoria, es importante establecer una relación entre las propiedades de la escoria, incluidas las propiedades químicas, minerales, físicas y cualquier propiedad potencialmente "negativa", así como las propiedades requeridas del producto final (Wang, 2016).

La elección de las técnicas de caracterización dependerá de los objetivos específicos de estudio y de las propiedades de la escoria que se deseen analizar.

En la Tabla 1 se muestran las técnicas de caracterización más comunes para materiales.

Tabla 1. Técnicas de caracterización

Tipo de análisis	Técnicas	Información
Análisis químico	<ul style="list-style-type: none"> • Espectroscopia de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES). • Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). 	Estas técnicas permiten identificar los elementos presentes y concentración.
Análisis mineralógico	<ul style="list-style-type: none"> • Difracción de rayos X (DRX). • Microscopía electrónica de barrido (SEM). 	Estas técnicas revelan la presencia de minerales y fases cristalinas.
Caracterización física	<ul style="list-style-type: none"> • Densidad. • Porosidad. • Resistencia a la compresión. 	Estos datos son útiles para comprender el comportamiento en diferentes aplicaciones.
Análisis térmico	<ul style="list-style-type: none"> • Termogravimetría (TG). • Calorimetría diferencial de barrido (DSC). 	Estas técnicas se utilizan para estudiar las propiedades térmicas como el punto de fusión, la capacidad calorífica y la estabilidad térmica.

Análisis de lixiviación	<ul style="list-style-type: none"> • Método de Ensayo de Lixiviación de Columna (TCLP). • Método de Ensayo de Lixiviación Estática (SPLP). 	<p>Para evaluar la lixiviación de metales u otros componentes tóxicos en el medio ambiente, se pueden llevar a cabo pruebas de lixiviación</p>
--------------------------------	--	--

Se deben contemplar tanto aspectos de ingeniería como ambientales ya que es un garante de un uso racional, seguro y exitoso. De la misma forma una relación cuantitativa es la clave para garantizar la utilización a largo plazo de una escoria y para transferir de manera constante una escoria a un coproducto de manera sostenible.

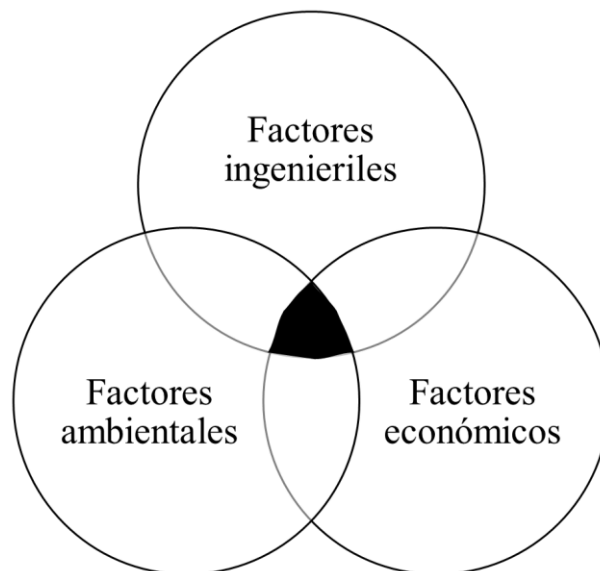


Figura 3.- Relación entre aspectos de ingeniería, ambientales y económicos en el aprovechamiento de escorias (modificado de Wang (2016))

Revalorización de escorias

Elegir la vía adecuada de extracción y recuperación de elementos de interés de un residuo depende de factores físicos y químicos. También se deben de tomar la normatividad para el uso de reactivos del país en el que se opera y la cadena de suministro de dichos reactivos. Por ejemplo, es muy importante determinar la composición química de la escoria, que normalmente contiene una mezcla de metales como el cobre, hierro, plomo y zinc (Nowinska, 2020).

Cuando se consideran métodos pirometalúrgicos se debe poner especial atención en las emisiones atmosféricas (Hylander y Herbert, 2008; Dunn y col., 2012). Un ejemplo son las emisiones de mercurio de la producción de metales no ferrosos, específicamente del procesamiento de minerales de cobre, plomo y zinc (Hylander y Herbert, 2008). Además, se observa que la mayoría de las plantas de fundición no cuentan con esquemas de monitoreo precisos y los inventarios globales de cantidades emitidas se basan en datos insuficientes.

Por otra parte, cuando se consideran métodos hidrometalúrgicos, específicamente cianuración, se deben de tomar en cuenta métodos de destrucción de cianuro (Akcil 2003; Botz y col., 2016). La mayoría de los procesos de destrucción química de cianuro se basan en el principio de convertir el cianuro en cianato, el cual es un compuesto menos tóxico, a través de una reacción de oxidación. Algunas técnicas para la oxidación de cianuro libre a cianato son (1) oxidación natural, (2) proceso de peróxido de hidrógeno, (3) proceso de dióxido de azufre, (4) proceso de cloración alcalina, (5) oxidación biológica y (6) ozonización (Botz y Mudder, 2002).

Se ha reportado la revalorización de las escorias para recuperar plata mediante el procesamiento pirometalúrgico (Gamboa-Hernández y col., 2018). Por otra parte, la revalorización de escorias provenientes de los procesos pirometalúrgicos del cobre se ha abordado mediante flotación, lixiviación y fundición (Sánchez y col., 2004).

Estos métodos se utilizan para separar los componentes de la escoria y obtener productos comerciales útiles, como concentrados de cobre, hierro y otros metales, así como materiales de construcción y abrasivos (Avarmaa y col., 2020). El procesamiento de este tipo de escorias también puede ayudar a reducir los costos de eliminación de residuos y mejorar la sostenibilidad ambiental de la industria minera del cobre.

La revalorización de escorias vitrificadas como materia prima ha sido de interés en los últimos años principalmente por su aplicación en la industria de la construcción y aislamiento térmico. Los polímeros sintéticos a partir de escorias vitrificadas presentan características adecuadas en términos de resistencia (Yung-Chin y col., 2016).

Otro aspecto importante de la revalorización de escorias es la remediación. Debido a la creciente demanda mundial de metales no ferrosos, se han generado problemas ambientales relacionados con las áreas de almacenamiento de escoria en las unidades mineras (Ban y col., 2022). La remediación de estas escorias utilizando materiales de cemento sustitutos del cemento Portland es una alternativa viable, ya que los desechos sólidos peligrosos se convierten en valiosos materiales de construcción (Ban y col., 2022).

Las escorias granuladas de alto horno derivadas de la industria de fabricación de hierro se han utilizado ampliamente para la producción de cementos activados con álcali (Criado y col., 2017). La tecnología de activación alcalina se ha utilizado para producir cementos inorgánicos durante más de un siglo, como un medio para valorizar desechos o subproductos industriales derivados de diferentes actividades comerciales

El tratamiento de las escorias, así como los procesos aplicados para su revalorización van a depender del tipo de escoria y las propiedades particulares de

estás. Además, la gestión adecuada de las escorias es esencial para garantizar que se utilicen de manera segura y provechosa.

Cianuración

La cianuración es un proceso bastante común, utilizado para la extracción de oro y plata de minerales, concentrados minerales o residuos mineros que los contienen. El cianuro se utiliza en los procesos metalúrgicos debido a su capacidad para formar complejos con los metales preciosos (Kuyuckak y Akcil, 2013). Estos complejos son estables, en términos termodinámicos, en soluciones alcalinas y permiten la extracción eficiente de los metales.

Los procesos de cianuración consisten en extraer constituyentes solubles de un sólido mediante un solvente, al que se le llaman agente lixivante (Habashi, 1997; Marsden y House, 2006). El agente lixivante más utilizado para la extracción de metales preciosos es el cianuro, principalmente el cianuro de sodio.

El proceso de cianuración está diseñado para la extracción de oro/plata a partir de los minerales que los contienen y el proceso fue puesto en práctica por MacArthur entre 1887 y 1889 (Yannopoulos, 1991). Es importante mencionar que, aunque se considera al cianuro como un agente lixivante selectivo, éste también forma complejos con otros metales como el cobre, zinc, hierro, etc. (Adams, 2016).

Es importante considerar que para que un mineral pueda ser cianurado, debe contener al oro y a la plata en un estado de oxidación que permita que sean complejados. Es común utilizar el proceso de cianuración en concentrados minerales o directamente en el mineral que se explota mediante el minado (Nava-Alonso y col., 2007). El proceso se lleva a cabo en reactores agitados, donde se mezcla la solución de cianuro de sodio con la pulpa del mineral a tratar (Mudder y col., 2001).

En la Figura 4 se observa el proceso de cianuración. En primer lugar, es necesario que el mineral a tratar tenga un d_{80} de 75 μm , un tamaño óptimo para producir una pulpa que se puede lixiviar más eficientemente (Yannopoulos, 1991; Adams, 2016).

La pulpa mineral se mezcla con una solución de cianuro de sodio y se agita en reactores durante el tiempo establecido. El cianuro se une químicamente con el oro y la plata para formar un complejo soluble en agua de acuerdo con la reacción de Elsner (ver Ec. 1).

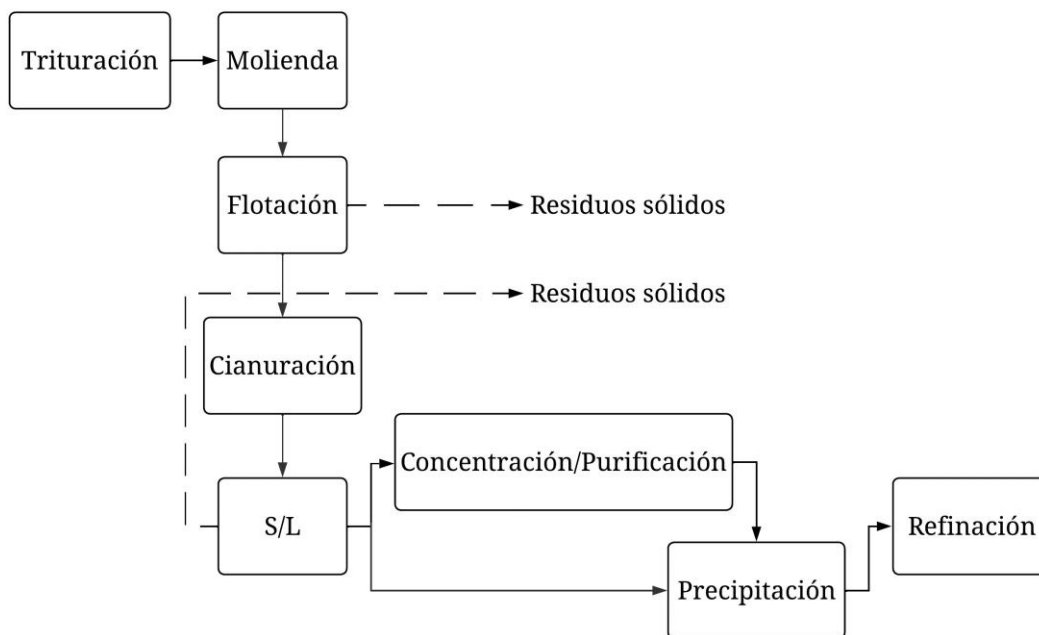
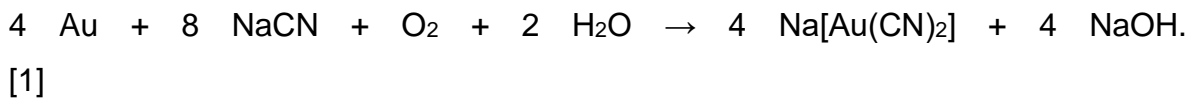


Figura 4.- Diagrama de flujo simplificado del proceso de cianuración.

Después de la cianuración, la solución se envía a un espesador para separar los sólidos del líquido y el lixiviado, comúnmente es tratado con carbón activado para adsorber el complejo de oro y plata (Yannopoulos, 1991). El carbón activado se

utiliza debido a su alta capacidad de adsorción y su facilidad de manejo ([Adams, 2016](#)).

El carbón activado cargado se limpia con una solución alcalina para llevar a cabo la desorción del oro y la plata, formando una solución concentrada que se procesa posteriormente para recuperar el metal ([Adams, 2016](#)). El carbón activado recuperado se regenera mediante la eliminación del complejo de oro y plata mediante la oxidación y la limpieza con ácido.

En general, la cianuración es un proceso ampliamente utilizado para la extracción de oro y plata de sus minerales y concentrados, debido a su eficacia y eficiencia en la extracción. Sin embargo, su uso también ha sido objeto de controversia debido a los posibles riesgos ambientales asociados con el uso de cianuro, como la toxicidad para la fauna y la flora acuática, así como la posibilidad de accidentes y derrames ([Abdul-Wahab y Marikar, 2012](#)).

Desafíos en la Extracción de Metales Preciosos a partir de Escorias

El proceso de extracción puede parecer sencillo; sin embargo, existen numerosos desafíos. El principal es la composición de la escoria, ya que puede variar según la composición del mineral y los reactivos que usen para su procesamiento ([Wang, 2016](#)). Además, elegir la ruta de revalorización correcta, depende de muchos factores, como las características de las escorias a tratar, las tecnologías disponibles, la regulación medioambiental y la evaluación económica de cada una de estas alternativas.

Dependiendo de las condiciones de producción, los procesos metalúrgicos y la composición del material inicial, la forma en que los metales de interés se encuentren presentes en las escorias va a cambiar. Gamboa-Hernández y col., (2018), han dejado constancia de la presencia de la plata como sulfuro de plata en

las escorias de los procesos hidrometalúrgicos para la obtención de oro y plata (fundición de los precipitados del Merrill-Crowe).

Es importante considerar que la lixiviación del sulfuro de plata es un proceso influenciado por fenómenos de solubilidad ([Luna y Lapidus, 2000](#)). Por lo que es necesario tener amplio conocimiento en la serie de reacciones involucradas. Algunas de las implicaciones que pueden presentarse al cianurar el sulfuro de plata son la formación de ácido cianhídrico (HCN), bajo rendimiento de lixiviación, uso de reactivos adicionales (incremento de costos operativos).

El uso de algunos reactivos puede ser tóxico, por eso se deben manejar adecuadamente y se deben implementar tecnologías para su estabilización química ([Ledin y Pedersen, 1996](#)). Siempre existe el riesgo de contaminación ambiental si los reactivos utilizados no se tratan correctamente.

Se han desarrollado estudios para proponer nuevas aplicaciones para los diferentes tipos de escorias que se generan por los procesos pirometalúrgicos. Sin embargo, existen pocos registros de estudios de escorias de metales preciosos y su reprocesamiento para otros usos.

Para recuperar estos metales contenidos en escorias u otros desechos, así como posiblemente otros elementos de interés comercial, en los últimos años se ha implementado procesos como concentración gravimétrica, así como, procesos hidrometalúrgicos y pirometalúrgicos aplicables a minerales ([Bazan y col., 2015](#)).

Impacto medioambiental

La extracción de metales preciosos de la escoria puede tener un impacto significativo en el medio ambiente. Para mitigar estos riesgos es importante que las empresas sigan normas ambientales estrictas e implementen prácticas sostenibles,

como el reciclaje y la reutilización de materiales de desecho siempre que sea posible.

Una de las preocupaciones al considerar la cianuración como una vía de revalorización es el impacto ambiental que generan los jales cianurados. El uso de productos químicos como el cianuro puede provocar la contaminación del agua y la eliminación de productos de desecho puede provocar la contaminación del suelo (Dong y col., 2021).

El uso del cianuro debe ser controlado y regulado adecuadamente para minimizar los riesgos ambientales y proteger la salud y seguridad de las personas y los ecosistemas. El código Internacional de Gestión del Cianuro es un programa de certificación voluntario para empresas que fabrican, transportan y utilizan cianuro para la producción de oro y plata, principalmente.

El código fue desarrollado por el *International Cyanide Management Institute* (i.e., Instituto Internacional de Gestión del Cianuro) en colaboración con diversos organismos gubernamentales, la industria minera, organizaciones no gubernamentales y otras partes interesadas. Su objetivo principal es establecer estándares para la producción, transporte y uso seguro del cianuro en la minería del oro, con la finalidad de prevenir impactos ambientales y riesgos para la salud humana.

Los aspectos clave del código del cianuro se presentan en la Figura 5. Principalmente establece las directrices y estándares para la gestión segura de cianuro en todas las etapas, desde la fabricación hasta el transporte y el uso en la minería.

Las instalaciones mineras que adhieren al Código deben someterse a auditorías independientes para evaluar su cumplimiento con los estándares establecidos. A su vez fomenta la transparencia y la comunicación abierta entre las partes interesadas, incluidas las comunidades locales y las organizaciones no gubernamentales.

Promueve la capacitación de los trabajadores y la educación de las comunidades locales sobre los riesgos y las prácticas seguras relacionadas con el cianuro y establece un marco para la mejora continua en las prácticas de manejo del cianuro, considerando las últimas investigaciones y avances tecnológicos.

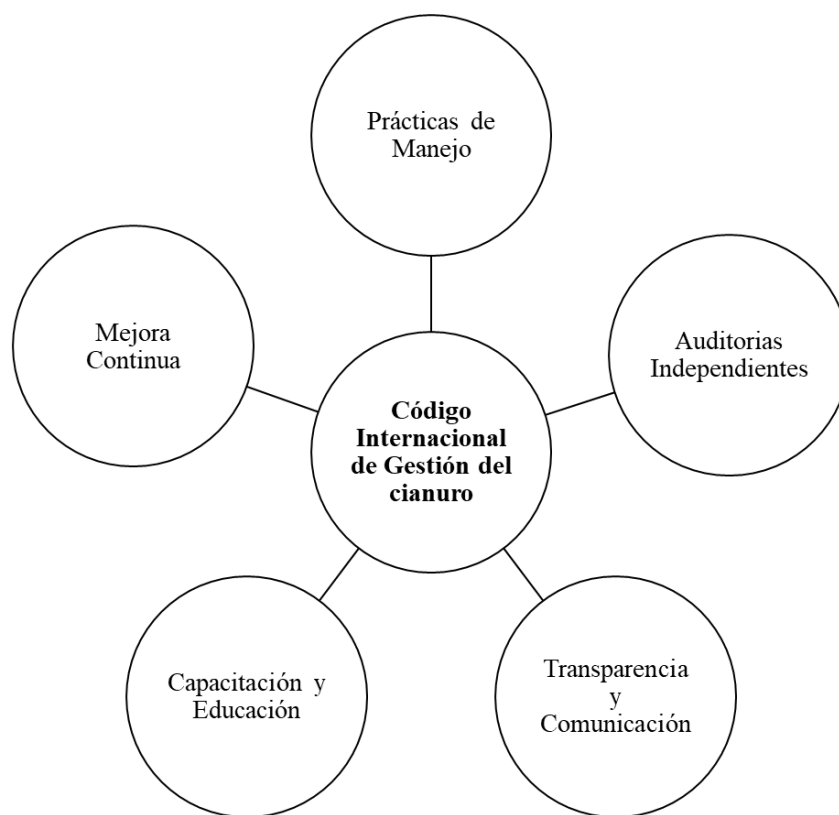


Figura 5.- Aspectos clave del Código Internacional de Gestión del Cianuro (International Cyanide Management Institute, 2021).

Conclusión

La composición química de las escorias está en función de la vía del procesamiento empleado y dependiendo de la naturaleza de la mena y de los fundentes que se

utilicen en el proceso. Las escorias generadas mediante la fusión de los precipitados del proceso Merrill Crowe pueden contener especies como sulfuro de plata, óxidos de hierro, dióxido de silicio, silicatos de sodio y zinc, entre otros. Por otra parte, las escorias formadas en el procesamiento pirometalúrgico del cobre es común que pueden tener la presencia de elementos como hierro, dióxido de silicio, óxido de calcio, óxido de magnesio, cobre, óxido de aluminio, manganeso y zinc.

Las escorias metalúrgicas tienen un papel importante en la industria debido a su amplia variedad de aplicaciones en diferentes industrias desde la construcción de carreteras y la fabricación de cemento hasta la limpieza de superficies y la producción de materiales de construcción. Estos residuos representan un recurso estratégico ya que al tratarlos e integrarlos a otras industrias se reduce el impacto ambiental de la producción industrial de metales y se contribuye a la economía del proceso mediante el que se generan.

Aunque la extracción de metales preciosos a partir de residuos como las escorias metalúrgicas es compleja, ya que se requiere una comprensión a fondo de las reacciones químicas y de la naturaleza física y química del residuo, es una etapa clave para transitar a una economía circular. En algunos casos, la revalorización de estos residuos resulta la mejor opción, debido a la cantidad de metales de interés que contienen, aun sí se encuentran formando especies complejas.

La metodología para extraer el metal precioso puede variar. En el caso del oro y la plata, el procesamiento que resulta con más beneficio en términos de recuperación y practicidad es la cianuración. Aunque la reputación del cianuro ante la sociedad no es la mejor, es importante difundir que cuando se implementan adecuadamente los procesos de destrucción de cianuro el riesgo medioambiental es nulo y esto convierte al proceso de cianuración en uno de los más confiables.

Referencias bibliográficas

Abdul-Wahab, S. A. y Marikar, F. A. (2012). The environmental impact of gold mines: pollution by heavy metals. *Central European Journal of Engineering*. 2: 304-313. DOI: 10.2478/s13531-011-0052-3

Acosta, A., Aineto, M., Iglesias, I. (2001). Physico-chemical characterization of slag waste coming from IGCCthermal power plant. *Materials Letters*. 50: 246-250. DOI: 10.1016/S0167-577X(01)00233-6

Akcil, A., (2003). Destruction of cyanide in gold mill effluents: biological versus chemical treatments. *Biotechnology Advances*. 21: 501-510. DOI: 10.1016/S0734-9750(03)00099-5

Adams, M. D. (2016). Gold Ore Processing. *Project Development and Operations*. DOI: 10.1016/C2015-0-00699-2

Avarmaa, K., O'Brien, H., Klemettinen, L., Taskinen, P. (2020). Precious metal recoveries in secondary copper smelting with high-alumina slags. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 22: 642–655. DOI: 10.1007/s10163-019-00955-w

Ban J., Sun, K. Yao J., Sunahara G., Hudson-Edwards K., Jordan G., Alakangas L., Ni W., Chi-Sun P. (2022). Advances in the use of recycled non-ferrous slag as a resource for non-ferrous metal mine site remediation. *Environmental Research*. 213: 113533. DOI: 10.1016/j.envres.2022.113533

Bas, A. D., Ghali, E., Choib, Y. (2017). A review on electrochemical dissolution and passivation of gold during cyanidation in presence of sulphides and oxides. *Hydrometallurgy* 172: 30–44. DOI: 10.1016/j.hydromet.2017.06.021

Bazan, V., Brandaleze, E., Valentini, M., Hidalgo, N. (2015). Characterization of Slags Produced During Gold Melting Process. *Procedia Materials Science*. 8: 851 – 860. DOI: 10.1016/j.mspro.2015.04.145

Botz, M. M., Mudder, T. I. (2002). Treatment of solutions and slurries for cyanide removal. En M. C. Adams (Ed.), *Mineral Processing Plant Design, Practice and Control (Second Edition)*. The Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. 474.

Botz, M.M., Mudder T.I., y Akcil A.U. (2016). Cyanide Treatment: Physical, Chemical, and Biological Processes In: *Gold Ore Processing (Second Edition)*. Project Development and Operations. 619-645.

Chen, J., Yan, B., Li, H., Li, P., Guo, H. (2018). Vitrification of blast furnace slag and fluorite tailings for giving diopside-fluorapatite glass-ceramics. *Materials Letters*. 218: 309-312. DOI: 10.1016/j.matlet.2018.02.020

Chi, G., Fuerstenau, M. C., Marsden, J. O. (1997). Study of Merrill-Crowe processing. Part I: Solubility of zinc in alkaline cyanide solution. *International Journal of Mineral Processing*. 49: 171-183. DOI: 10.1016/S0301-7516(96)00043-9

Chu, J.P., Hwang, I.J., Tzeng, C.C., Kuo, Y.Y., Yu, Y.J. (2018). Characterization of vitrified slag from mixed medical waste surrogates treated by a thermal plasma system. *Journal of Hazardous Materials*. 58: 179–194. DOI: 10.1016/S0304-3894(97)00130-1

Criado, M., Ke, X., Provis, J. L., Bernal, S. A. (2017). Alternative inorganic binders based on alkali-activated metallurgical slags. *Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites*. 185-220. DOI: 10.1016/B978-0-08-102001-2.00008-5

Cui, J. y Roven, H. J. (2011). Waste In: A Handbook for Management. *Electronic Waste*. 281-296. DOI: 10.1016/B978-0-12-381475-3.10020-8

Dong, K., Xie, F., Wang, W., Chang, Y., Lu, D., Gu, X., Chen, C. (2021). The detoxification and utilization of cyanide tailings: A critical review. *Journal of cleaner production*. 302: 15. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126946

Douglas, E. y Zerbino, R. (1986). Characterization of granule and pelletized blast furnace slag. *Cement and concrete research*. 16: 662-670. DOI:10.1016/0008-8846(86)90039-6

Dunn, J. B., Gaines, L., Sullivan, J. y Wang M. Q. (2012). Impact of Recycling on Cradle-to-Gate Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Automotive Lithium-Ion Batteries. *Environmental Science & Technology*. 46: 12704-12710. DOI: 10.1021/es302420z

Gamboa-Hernández, A., Parga-Torres J. R., y Moreno Casillas H. A. (2018). Recovery of silver from slags generated by melting precipitates from the Merrill–Crowe process. *Canadian Metallurgical Quarterly*. DOI: 10.1080/00084433.2018.1544342

González-Ibarra, A.A., Nava-Alonso, F., Fuentes-Aceituno, J.C., Uribe-Salas, A. (2016). Hydrothermal decomposition of industrial jarosite in alkaline media: the rate determining step of the process kinetics. *Journal of Mining and Metallurgy*. 52: 135-142. DOI: 10.2298/JMMB150430016G

Habashi, F. (1997). Handbook of Extractive Metallurgy, Vol. II and III. Wiley-VCH.

Hylander, L. D. y Herbert R. B. (2008). Global Emission and Production of Mercury during the Pyrometallurgical Extraction of Nonferrous Sulfide Ores. *Environmental Science & Technology*. 42: 5971–5977. DOI: 10.1021/es800495g

International Cyanide Management Institute (2021). The International Cyanide Management Code. Disponible en: www.cyanidecode.org

Kanari, N.E., Allair, I., Gaballah, A., Garcia, F. (1999). Characterization of polluting elements in slag from the incineration of waste from the chemical and metallurgical industry. *Revista de Metalurgia (Madrid)*. 35: 3-10

Kinnunen, P., Karhu, M., Yli-Rantala, E., Kivikytö-Reponen, P., Mäkinen, J. (2022). A review of circular economy strategies for mine tailings. *Cleaner Engineering and Technology*. 8: 100449

Kuyucak N., Akcil A., (2013). Cyanide and removal options from effluents in gold mining and metallurgical processes. *Minerals Engineering*. 50: 13-29. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.05.027

Ledin, M., y Pedersen, K. (1996). The environmental impact of mine wastes — Roles of microorganisms and their significance in treatment of mine wastes. *Earth-Science Reviews*. 41: 1–2, 67-108. DOI: 10.1016/0012-8252(96)00016-5

Li, Z., Li, J., Spooner, S., Seetharaman, S. (2021). Basic Oxygen Steelmaking Slag: Formation, Reaction, and Energy and Material Recovery. *Materials Recovery*. Steel research international. DOI: 10.1002/srin.202100167

Liu, T., Xie, Y., Guo, X., Zhang, J., Zhu, L., Luo, Z., Tang, Y., Lu, A. (2021). The role and stabilization behavior of heavy metal ions in eco-friendly porous semi-vitrified ceramics for construction application. *Journal of Cleaner Production*. 292: 1-17. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.125855

Luna, R. M. y Lapidus, G. T. (2000). Cyanidation kinetics of silver sulfide. *Hydrometallurgy*, 56: 171–188. DOI: 10.1016/s0304-386x(00)00072-4

Marsden, J. O., y House, C. I., (2006). Chemistry of Gold Extraction (Second Edition). *Society for Mining, Metallurgy, and Exploration*. 120

Mills, K. Yuan, L., Jones, R.T. (2011). The estimation of slag properties. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 110: 649-658

Mudder, T. I., Botz, M. M. y Smith, A. (2001). Chemistry and treatment of cyanidation wastes. Mining Journal books LTD London.

Muller, A., Blachnik, R. (2002). Reactivity in the system copper–arsenic–sulfur I. The formation of Cu_3AsS_4 , enargite. *Thermochemical*. 387: 153–171.

Nava-Alonso, F., Elorza-Rodríguez, E., Uribe-Salas, A., Pérez-Garibay, R. (2007). Análisis químico de cianuro en el proceso de cianuración: revisión de los principales métodos. *Revista de Metalurgia*, 43: 20-28.

Norma Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009, Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros. Diario Oficial.

Nowinska, K. (2020). Mineralogical and Chemical Characteristics of Slags from the Pyrometallurgical Extraction of Zinc and Lead. *Minerals*. 10: 371. DOI: 10.3390/min10040371

Pan, F., Lv, X., He, W., Pei, G. (2020). Preparation of Expanded Slag Ball with Blast Furnace Slag by Rotary Cup. In: Peng, Z., et al. 11th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. *The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-36540-0_29

Panesar D. K. (2019). Supplementary cementing materials. Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete (Second Edition) *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*. 55-85

Pasetto, M. y Baldo, N. (2010). Experimental evaluation of high-performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags. *Journal of Hazardous Materials*. 181: 938-948. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.05.104

Puertas, F. (1995). Cementos de escorias activadas alcalinamente: Situación actual y perspectivas de futuro. *Materiales de construcción*, 45: 53-64.

Rai, V., Liu, D., Xia, D., Jayaraman, Y., Gabriel, J.-C.P. (2021). Electrochemical Approaches for the Recovery of Metals from Electronic Waste: A Critical Review. *Recycling*, 6: 53. DOI: 10.3390/recycling6030053

Reith, F., Zammit, C.M., Rogers, S.L. (2012). Potential utilization of microorganism in gold processing: a review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 121: 251-260. DOI: 10.1179/1743285512Y.0000000017

Sánchez, M., Parada, F., Parra, R., Marquez, F., Jara, R., Carrasco, J.C., y Palacios, J. (2004). Management of copper pyrometallurgical slags: giving additional value to copper mining industry. *The South African Institute of Mining and Metallurgy*. VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts.

Santacruz-Torres, J. y Torres-Agredo J. (2019). Aprovechamiento de escorias de fundición secundaria de plomo en ladrillos cerámicos. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. 29: 8-18. DOI: 10.18359/rcin.3495

Sarfo, P., Wyss, G., Ma, G, Das A., Young, C. (2017). Carbothermal reduction of copper smelter slag for recycling into pig iron and glass. *Minerals Engineering*. 107: 8-19. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.02.006

Shi, C., Meyer, C., & Behnood, A. (2008). Utilization of copper slag in cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*. 52: 1115–1120. DOI: 10.1016/j.resconrec.2008.06.008

Souza, A.J., Pinheiro, B.C.A., Holanda J.N.F. (2010). Recycling of gneiss rock waste in the manufacture of vitrified floor tiles. *Journal of Environmental Management*. 91: 685-689. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.09.032

Tzen-Chin, L., Wei-Jer, W., Ping-Yu, S. (2008). Slag–cement mortar made with cement and slag vitrified from MSWI fly-ash/scrubber-ash and glass frit. *Construction and Building Materials*. 22: 1914–1921. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.07.030

Vilchis-Carbajal, S., Gonzalez, I. y Lapidus, G. T. (2000). An electrochemical study of gold cementation with zinc powder at low cyanide concentration in alkaline solutions. *Journal of Applied Electrochemistry*. 30: 217-229. DOI: 10.1023/A:1003820807315

Wang, G. C. (2016). Nonferrous metal extraction and nonferrous slags. *The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction*. 35-61

Yannopoulos, J. C. (1991). Cyanidation of Gold Ores In Yannopoulos J. C., The extractive metallurgy of gold, 1st Ed. New York, USA. Van Nostrand Reinhold. 141-168

Yung-Chin, D., Yin-Shya, F., Ta-Wui, C. (2016). Preparation and characterization of vitrified slag/geopolymers for construction and fire-resistance applications. *Materials and Structures*. 49: 1883–1891. DOI: 10.1617/s11527-015-0620-8

Yuskel, I. (2018). Blast-furnace slag. *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete*. 361-415. DOI: 10.1016/B978-0-08-102156-9.00012-2

Zhang, L., Malfliet, A., Blanpain, B., Guo M. (2022). Understanding the relationship between slag crystallization behaviour and electrical conductivity under isothermal conditions for online slag solidification monitoring in slag recycling. *Resources, Conservation and Recycling*. 182: 106-319. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106319