

Manejo selectivo de los estériles de mina. Clasificación NAG-PAG

Fernando Diaz Riopa. Ingeniero Técnico de Minas.

Javier Amorrortu Barreda. Ingeniero Técnico de Minas.

Constantino Penedo Ferreiro. Ingeniero Agrónomo.

Pablo Núñez Fernández. Licenciado en Geología.

José Ramón García Álvarez. Licenciado de Grado en ciencias Químicas.

Jesús Caballos. Licenciado en ciencias de la Información.

La generación de aguas ácidas ha sido una de las principales problemáticas ambientales en la actividad minera históricamente. Por ello, en la actualidad, la minería se dota de técnicas que evitan impactos negativos sobre el medio. Una de las claves fundamentales para lograr este objetivo es realizar una adecuada caracterización del estéril de mina que sirva de base para su correcta gestión. Los estériles se dividen en dos categorías, según su potencial acidificante, NAG-PAG (No generadora o posiblemente generadora de ácido). Previo al inicio de la actividad, se establece un procedimiento de selección para la fase de operación, y se diseñan las instalaciones más adecuadas para el almacenamiento del material PAG.





Dentro de la actividad minera, los procesos de extracción y tratamiento del mineral generan estériles mineros. Estos materiales pueden tener propiedades físicas y químicas variables. Los volúmenes y el tipo de material producido por la actividad minera dependen del tipo de yacimiento y de las diferentes alternativas tecnológicas utilizadas para su extracción. La composición química de los estériles varía de forma considerable de acuerdo con el mineral extraído y la naturaleza de la formación geológica que contiene al yacimiento mineral.

La roca estéril es un producto de la excavación y es almacenada de forma indefinida en depósitos que suelen estar localizadas en zonas cercanas a las áreas de extracción. Este tipo de materiales generado durante la excavación de la superficie, con el objetivo de exponer las zonas mineralizadas para su extracción o aprovechamiento económico.

El Drenaje Ácido de Roca (ARD: Acid Rock drainage) es la salida de agua ácida de las minas metálicas o de carbón. El ARD se produce por la oxidación de los sulfuros al ser éstos expuestos al aire y al agua; el proceso de oxidación tiene lugar desde condiciones de pH neutras a condiciones de pH ácidas, con o sin disolución de metales pesados, aunque este tipo de drenaje siempre contiene sulfatos (Gard Guide, INAP, 2011).

La minería sostenible aborda este problema ambiental asociado a la minería metálica: se han desarrollado los conocimientos para predecir sus riegos, y los procedimientos y técnicas para prevenir sus efectos en el medio ambiente.

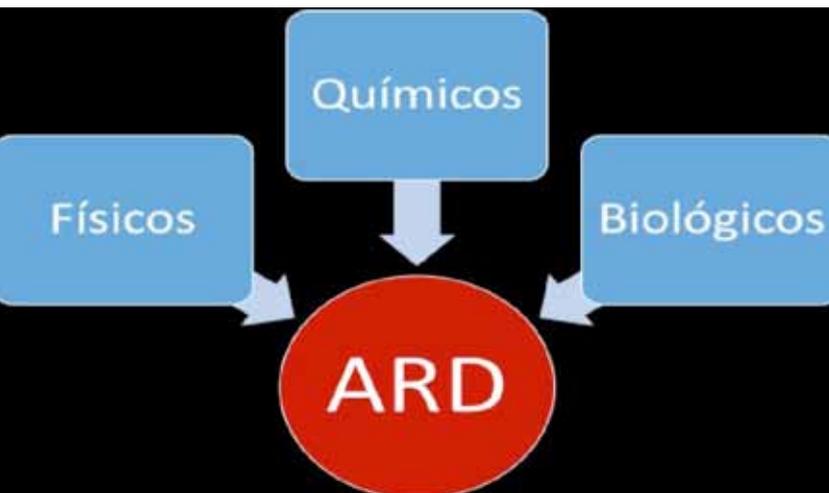
El ARD es un fenómeno abordado en el MTWR **BREF (Best Available Techniques) – Documento de referencia de la gestión de Residuos de las Industrias Extractivas (MTWR: Tailings and Waste-Rock in Mining Activities)**, de conformidad con la *Directiva 2006/21/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de marzo de 2006 sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas y por la que se modifica la Directiva 2004/35/CE.*

La Directiva 2006/21/CE tiene como objetivo, Artículo 1:

“...establecer las medidas, procedimientos y orientaciones para prevenir o reducir en la medida de lo posible los efectos adversos sobre el medio ambiente, en particular sobre las aguas, el aire, el suelo, la fauna, la flora y el paisaje, y los riesgos para la salud humana derivados de la gestión de los residuos de las industrias extractivas”.

El BREF establece las **Mejores Técnicas Disponibles – MTD** (en inglés BAT) en relación con la gestión de la roca estéril y de los residuos de extracción y tratamiento procedentes de la actividad minera.

El hecho de que el BREF defina MTD específicas para prevenir el ARD, hace evidente que es un fenómeno que puede ocurrir en la actividad minera, y que por tanto existe el conocimiento y las técnicas para su control, incorporándose estas MTD en los proyectos de minería sostenible como el propuesto para la reapertura del Proyecto minero de cobre de Touro (A Coruña). Es precisamente la no aplicación de estas MTD en anteriores actividades extractivas de antiguas minas, como la de Touro, lo que puede implicar



Factores que influyen en la generación de drenaje ácido de roca.

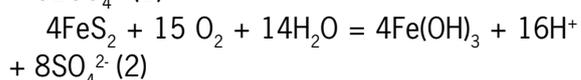
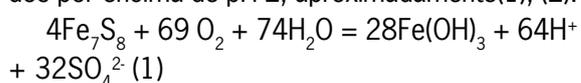
la creación de pasivos ambientales, principalmente la generación de aguas ácidas.

GENERACIÓN DE ARD

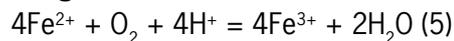
La generación del ARD es un fenómeno complejo controlado por una combinación de factores físicos, químicos y biológicos. Es preciso conocer una serie de conceptos para poder valorar los riesgos del drenaje ácido, definir las MTD específicas para su prevención, los controles ambientales necesarios y las medidas apropiadas para un manejo selectivo del estéril de mina según su potencial acidificante.

El ARD se refiere al agua ácida que se crea cuando los minerales con sulfuros, en particular la pirita, se oxida por su exposición a condiciones atmosféricas y, a través de una reacción química natural, producen ácido. El ARD tiene el potencial de introducir acidez y metales disueltos en el agua, lo que puede tener consecuencias medioambientales negativas, por ello se debe realizar una evaluación preliminar del potencial de generación, e implantar MTD para contrarrestar dicho fenómeno.

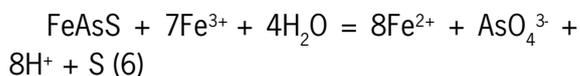
La pirita, arsenopirita y calcopirita son relativamente estables en soluciones oxigenadas en un amplio rango de pH; la pirrotina y marcasita son menos estables y se oxidan a Fe(III) como hidróxidos por encima de pH 2, aproximadamente(1), (2):



Además, las especies Fe(II) se oxidan a Fe(III), de la siguiente forma:



Las especies Fe(III) también son fuertes agentes oxidantes que ayudan en la oxidación de los sulfuros:



$\text{CuFeS}_2 + 10\text{Fe}^{3+} + 4\text{H}_2\text{O} = 11\text{Fe}^{2+} + \text{Cu}^{2+} + 8\text{H}^+ + \text{S} + \text{SO}_4^{2-}$ (7) Bibliografía la prevención y el control del ARD son piezas clave en la gestión de explotaciones mineras sostenibles durante su funcionamiento y después del cierre de las mismas.

CONSECUENCIAS DEL ARD

El pH del agua disminuye una vez que comienza la oxidación del sulfuro. En condiciones de pH bajo, el Fe^{2+} (hierro ferroso) se puede oxidar a hierro férrico, que a su vez es capaz de reducirse de nuevo, oxidando a otros minerales. Como resultado, el ARD frecuentemente contiene altas concentraciones de otros metales disueltos (As, Sb, Bi, etc. procedentes de la oxidación de otros sulfuros presentes en el yacimiento, tales como la arsenopirita u otros.

La formación de ARD ocurre naturalmente donde los minerales de sulfuro están expuestos a la atmósfera.

Las actividades de excavación tienen el potencial de acelerar el proceso de ARD al aumentar la superficie expuesta a la oxidación de los minerales de sulfuro. De hecho esta problemática también aparece en otras actividades como la obra pública, como puede observarse en los taludes de la autovía AG-64 Ferrol – Vilalba, a su paso por As Pontes.

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA TASA DE ARD

La tasa del ARD depende de una serie de factores, tales como:

1. Tipo de minerales presentes: no todos los minerales de los sulfuros se oxidan a la misma velocidad, y pueden ser neutralizados por la presencia de otros minerales, lo que ralentizaría la producción de ARD.

Este proceso de neutralización natural es intenso cuando existe carbonato cálcico (principal constituyente de las cali-



zas), pero también son neutralizantes los carbonatos de hierro y magnesio, ciertos minerales silicatados y los hidróxidos de hierro y aluminio, que pueden ayudar a elevar el pH.

La cantidad relativa de estos minerales y rocas con capacidad neutralizadora de la acidez, respecto a la cantidad de sulfuros, determina la acidificación o no de las aguas. Si existe bastante carbonato cálcico, Su capacidad de neutralización afectara de forma significativa a la cinética del proceso global, siendo en ocasiones capaz de mantener la neutralidad del medio, si, por el contrario, la cantidad de sulfuros es grande, una vez consumidos los materiales neutralizantes los drenajes volverán a ser ácidos.

2. Cantidad de oxígeno presente: los minerales de sulfuro se oxidan más rápido cuanto más elevada sea la concentración de oxígeno. Como resultado, las tasas de formación de ARD son más altas en áreas donde los sulfuros están expuestos al aire que cuando están cubiertos por una capa de tierra de este modo se evita la exposición directa al oxígeno del aire, y con ello la generación de ARD.
3. Cantidad de agua disponible: A menudo se producen mayores volúmenes de ARD en las áreas donde hay más agua de infiltración disponible para la reacción, por ello, deben encapsularse los estériles de mina con potencial ARD. El agua es importante, además, porque puede transportar los productos de oxidación.
4. El grado de división de los minerales expuestos y su área superficial (m^2/m^3): aceleran en gran medida la reacción química de oxidación de los sulfuros y la formación de ARD.
5. Microorganismos presentes: algunos microorganismos pueden acelerar la producción de ARD. Hay una serie de bacterias que oxidan los minerales de azufre para recibir una fuente de energía; estas bacterias pueden variar la tasa de oxidación de azufre y son un factor importante en la formación del ARD.

IMPACTOS DEL ARD

El ARD tiene el potencial de disminuir la calidad del agua al reducir el pH y aumentar el contenido de metales disueltos tanto en aguas superficiales y subterráneas. El impacto ambiental del ARD depende del tamaño y la sensibilidad del cuerpo de agua afectado, y la cantidad de neutralización y dilución que se produce. Por ejemplo, el mismo volumen de ARD tendría un impacto mucho mayor en la calidad del agua en un regato que lo que tendría en el cauce de un río relevante, que tiene una mayor **capacidad de dilución**, y en su desembocadura, hay que considerar que el agua salada tiene una mayor **capacidad de amortiguación** de ácido que el agua dulce.

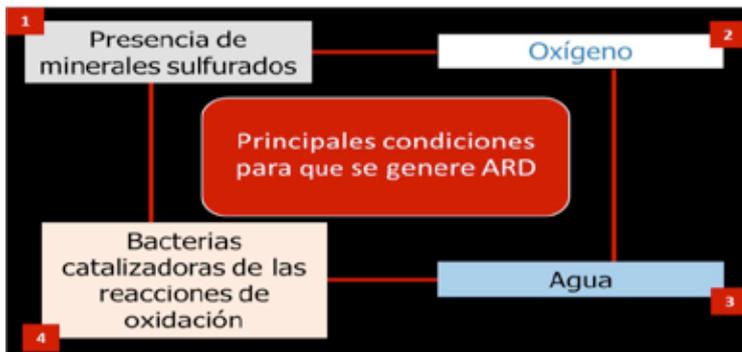
El agua ácida puede producir también efectos sobre la operación minera: el alto contenido de sulfatos en las aguas ácidas puede deteriorar la calidad del agua de mina, creando problemas de corrosión en las instalaciones y equipos de producción minera. Además dificulta las actuaciones de revegetación y estabilización de los residuos mineros, ya que la generación de ácido puede frenar el establecimiento de una capa vegetal.

Finalmente, los depósitos de estériles que generan ARD pueden convertirse en pasivos ambientales, requiriendo la aplicación de medidas correctoras muy costosas.

MANEJO SELECTIVO NAG-PAG

La composición mineral de los estériles es función de su litología. Dependiendo del contenido de azufre y de las propiedades de lixiviación, los estériles se clasifican generalmente en dos categorías: con potencial ARD, denominado PAG (*Potentially acidic rock drainage generating*), y sin potencial ARD, denominado NAG (*Non potentially acidic rock drainage generating*). Esto requiere un **manejo selectivo** de los materiales, que implica una **preordenación química y manejo selectivo de flujos de estériles**, definida en el BREF como:

“Segregación de materiales en función de sus propiedades químicas y de lixiviación para reducir la cantidad total de residuos que se eliminarán en una instalación de residuos de Categoría A (es decir, que contienen residuos peligrosos) y permitir el posible uso de la fracción inerte como subproductos, por ejemplo, áridos. El manejo selectivo



Factores que influyen en la generación de ARD.

también permite una administración más específica de cada volumen al adaptar y optimizar los tratamientos de residuos implementados”.

A modo de ejemplo, se muestra la gestión selectiva propuesta para el PAG y el NAG, de acuerdo con el MTWR BREF (EC-JRC 2009), y que se corresponde con el Manejo Selectivo que se plantea en el Proyecto Touro:

- Las formaciones geológicas en un depósito de mineral de sulfuros a menudo muestran **zonificación**, con un **contenido elevado de pirita en las capas cercanas al mineral**. En la minería a cielo abierto, en algunos casos, es posible **administrar selectivamente** los tipos estériles de mina utilizando las propiedades geoquímicas como criterio. Una cuidadosa cartografía geológica y análisis de seguimiento utilizando testigos de sondeos son medios muy útiles para proporcionar la información necesaria para la clasificación. En base a esto, es posible separar el estéril en PAG y NAG.
- El estéril NAG requerirá medidas de almacenamiento menos rigurosas que los estériles PAG, para este último se han diseñado instalaciones y operaciones de manejos específicas: depósito de estériles PAG, encapsulamiento, almacenamiento por debajo del nivel freático, etc.
- El material NAG también se puede usar para amortiguar el ácido generado por el material PAG, por ejemplo, en la mezcla, la disposición conjunta o la encapsulación.
- La gestión selectiva de los estériles no

exige tecnología avanzada, sino simples rutinas para la recopilación de información y la gestión del material de acuerdo con estos resultados.

- El estéril de bajo contenido en azufre puede cumplir los criterios de calidad exigibles para materiales de construcción, evitando el uso de nuevas materias primas y permitiendo el desarrollo de la **economía circular** (uso como árido en construcción y obra pública).

Al aplicar la preclasificación, se pueden lograr los siguientes beneficios:

- Prevención y / o reducción de la cantidad total de materiales estériles.
- Prevención y / o reducción de la cantidad total de estériles no inertes.
- Prevención y / o reducción de la cantidad total de estériles peligrosos.
- Reducción de la huella de las instalaciones de materiales extractivos.

APLICACIÓN DEL MANEJO SELECTIVO EN EL PROYECTO DE LA MINA DE TOURO

La clasificación previa y la manipulación selectiva de los volúmenes de estériles se suelen aplicar en la minería de metales con materiales estériles potencialmente generadores ácidos y no ácidos, como es el caso de la Mina de Touro, basándose en la evaluación de la relación de potencial de acidificación.

El proyecto de explotación incluye la caracterización, instalaciones y procedimientos específicos para la gestión NAG-PAG.

El programa de caracterización de estériles implementado en este proyecto tiene en cuenta, métodos, guías y normas aceptadas, a nivel europeo e internacionalmente, para predecir el comportamiento ambiental de los estériles. La caracterización inicial se basa en un grupo de muestras de sondeos cuidadosamente seleccionadas y representativas (225 muestras) de los volúmenes que se estima extraer durante la vida de la mina.

La evaluación del potencial generador de ARD debe llevarse a cabo mediante **ensayos**



geoquímicos estáticos y dinámicos o cinéticos. Los resultados de estos ensayos nos permiten definir el manejo ambiental adecuado de los residuos mineros.

El cometido de los ensayos estáticos es caracterizar el potencial de generación de ácido de una muestra representativa. Los definidos como potencialmente generadores de ácido, PAG, o los inciertos serán sobre los que se realicen los ensayos cinéticos.

Los ensayos cinéticos geoquímicos implican someter las muestras a las condiciones ambientales y simular condiciones controladas en el laboratorio, con el fin de confirmar el potencial para

generar acidez, determinar las velocidades de generación de ácido, oxidación de sulfuros, neutralización y, además, poder ensayar técnicas de control y tratamiento, si fuese necesario. El ensayo cinético más habitual es el de Celda Húmeda (HCT), El procedimiento de prueba se basa en ciclos de lavado con agua y evaluación del lixiviado. Se puede realizar in situ con agua de lluvia (en 1 año hidrológico completo) o en forzado (4 meses).

Los programas de caracterización geoquímica con muestras del yacimiento de Touro incluyen métodos de vanguardia aceptados internacionalmente para predecir el comportamiento ambiental de los estériles de mina. ■

BIBLIOGRAFÍA

Directiva 2006/21/Ce del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de marzo de 2006 sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas y por la que se modifica la Directiva 2004/35/CE.

Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Management of Waste from Extractive Industries in accordance with Directive 2006/21/EC. Elena Garbarino, Glenn Orveillon, Hans G. M. Saveyn, Pascal Barthe, Peter Eder. 2018.

Guía Metodológica sobre Drenaje Ácido en la Industria Minera. Ministerio de Minería de Chile. Noviembre 2002.

Drenaje ácido de mina generación y tratamiento. Instituto Geológico y Minero de España Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente. Osvaldo Aduvire - Dr. Ing. de Minas. Madrid 2006.

Ian Wark Research Institute & Environmental Geochemistry International (2002) ARD Test Handbook. P387A Project. Prediction and Kinetic Control of Acid Mine Drainage, AMIRA International, Melbourne.

The International Network for Acid Prevention (INAP) (2009) Global Acid Rock Drainage Guide (GARD Guide) <http://www.gardguide.com>.

Mine Environment Neutral Drainage (MEND) (2009) Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials. MEND Report 1.20.1. December 2009.

Nordstrom, D.K. and ALPERS, C.N. 1999, Geochemistry of Acid Mine Waters, in: The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Part A: Proces-

ses, Techniques, and Health Issues (Plumlee, G.S., September 2014 and M.J. Logsdon, eds), Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology, Volume 6A, Ch. 6, p. 133-154.

Proyecto Touro. Plan de muestreo y ensayos de laboratorio. Golder Associates. Febrero 2018.

Overview of Materials Characterization and Environmental Management Planning. Life Cycle Geo. Presentation given by Tom Meuzelaar. Abril 2019.

1. Hinojosa O., Oxidación de sulfuros, importante proceso de pretratamiento, Seminario (TPA 5340), Maestría en tecnología de protección ambiental, Universidad Técnica de Oruro, 2002.

2. Marsden, J. and House I., The Chemistry of gold extraction, first Edition, Ellis Horwood Limited, Gran Bretaña, 1992.

3. Peters, E., Direct Leaching of Sulfides: Chemistry and applications, Metal. Trans. 7(B), 505-517, 1976.

4. Osseo-Asare, K., Xue, T. and Ciminelli, V., Solution chemistry of cyanide leaching systems In: Precious Metals: Min. Extr.& Proc. Ed. Kudryk, Metall Soc. AIME, pp 173-197, 1984.

5. Garrels, R. and Christ, C.L., Solutions, Minerals and Equilibria, New York, pp 440, 1965.

6. Senanayake, G. & Muir, D. M., Speciation and reduction potentials of metal ions in concentrated chloride and sulphate solutions relevant to processing base metal sulphides, Metal. Trans. 19(B), 1988.

Se han consultado otras publicaciones.