

¿Minería sostenible? Algunas consideraciones desde la perspectiva química

Margarita I. Bernal-U., Mario Fernández Z.*, Virginia Montiel P., Hugo A. Saldarriaga N.

Centro de Investigaciones Químicas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

*Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos

La extracción de metales preciosos, resistentes a la corrosión y a la oxidación es un reto tecnológico importante. Esto se debe a que su estructura electrónica determina que reaccionan con un número limitado de sustancias, muchas de ellas con efectos negativos a la salud y el ambiente. La sostenibilidad de las industrias extractivas está asociada a impactos sociales y económicos negativos en las comunidades afectadas. Por la importancia económica que la minería tiene en muchas regiones del planeta y por la naturaleza no renovable de los recursos, la sostenibilidad de esta industria está asociada a la reducción de los impactos y el uso eficiente de los recursos necesarios para su operación. Para entender algunas de las vías que será necesario recorrer para fomentar el desarrollo de prácticas sostenibles en este sector, invitamos al Lector a un recorrido por algunos aspectos químicos de la minería.

Pocos códices indígenas describen el trabajo con oro y plata. La evidencia de la extracción y trabajo orfebre precolonial se aprecia en las piezas que sobrevivieron el pillaje y fundición durante la época de la Colonia. Las minas prehispánicas se encontraban en la sierra de Querétaro y en el bajo río Balsas. El oro de Guerrero y Oaxaca se sacaba, principalmente, de arenas de los ríos lavándolas en jícaras o extra-yéndolo de vetas superficiales. Antes de 1555 los metales preciosos se refinaban fundiendo los minerales con óxido de plomo (ver referencia 1). Cuenta la historia que a pesar del esfuerzo de los nativos por esconder sus minas, éstas fueron descubiertas cuando rocas utilizadas en la fogata que encendiera un grupo de soldados dejó hilillos de plata. Al calentar minerales que contienen plata y cobre con plomo en presencia de oxígeno del aire, el cobre y el plomo reaccionan con el oxígeno liberando la plata. Los romanos usaban esta cara y peligrosa técnica. Gran cantidad de óxido de plomo era necesaria y quienes la trabajaban sufrían envenenamiento con los vapores de plomo que salían del horno. La toxicidad por la exposición al plomo ha sido documentada desde hace más de 2,000 años. Ahora sabemos que el 95 % del plomo absorbido se alberga en los glóbulos rojos y el resto en ri-



1. Portada del Libro de G. Agricola. Imagen tomada de: <http://ihm.nlm.nih.gov/luna/ser-vlet/view/search?q=A013215> (imagen del dominio público, sin copyright).

ñones, hígado, sistema nervioso central y tejido óseo (ver referencia 2).

La minería colonial utilizó como guía el libro de G. Agricola, *De re metallica* (1556), cuya portada mostramos en la figura 1. Allí se incluyen técnicas empíricas probadas y revisadas de las que no se conocía el fundamento químico. En Sevilla, Bartolomé de Medina, comerciante, y Lorenzo, metalurgista alemán, decidieron buscar fortuna en la Nueva España. Perfeccionaron una receta que consistía en moler el mineral finamente, mezclarlo con salmuera concentrada y mercurio por varios días hasta que el mercurio, originalmente brillante, se oscureciese; señal que los minerales de plata se habían descompuesto y la plata formaba una aleación con el mercurio. La amalgama resultante debía lavarse con abundante agua y calentarse para evaporar el mercurio y obtener la plata pura. Medina viajó solo y se instaló cerca de Pachuca en 1555. Invitó a los mineros a una demostración de la extracción por amalgamación que llamó el método de patio. La demostración fue un fracaso, debido a que las pruebas que realizó en España en el Río Tinto, contenían cobre en el mineral y el mineral de Pachuca no lo tenía. Medina no se rindió y se dedicó a modificar el proceso de manera sistemática. Fue hasta que agregó un mineral que contiene cobre conocido como *magistral* que el proceso de amalgamación funcionó. Inmediatamente patentó el proceso y convenció a los mineros de utilizarlo. Aún sin haber comprendido el papel que las sales de cobre jugaban, Medina fue un ejemplo de los resultados de un trabajo de observación y experimentación riguroso. Su método se utilizó en las minas



2. Ilustración del método de patio en una Hacienda en Pachuca, Hidalgo. Imagen tomada de <http://pachucaeneltiempo.blogspot.mx/p/las-minas.html>

de México hasta 1900. La figura 2 muestra un grabado de un patio de hacienda. Las reacciones químicas de este método fueron poco estudiadas. Observaciones empíricas como la necesidad de utilizar caballos o esclavos para apisonar la compleja mezcla de reacción; la cantidad de *magistral* usada; la adición de cenizas de madera o cal para "arreglar" el proceso, fueron entendidas hace muy poco. Hoy sabemos que el primer paso es la transformación del sulfuro de plata en cloruro de plata por el cobre del *magistral* y el oxígeno del aire seguida de la reacción con mercurio para formar una amalgama líquida separable de los otros componentes de las rocas (ver referencia 3).

Medina y Lorenzo jamás imaginaron el impacto que su invención tendría en el mundo entero. Este proceso convirtió a Europa en el centro de la economía del mundo, pero debido a lo rudimentario de los métodos utilizados, produjo un problema de contaminación enorme. Por cada kilo de plata purificada, dos kilos de mercurio se desperdiciaron. Se estima que durante los tres siglos en que este método se utilizó intensivamente, cerca de 200 mil toneladas de mercurio se dispersaron y ahora contaminan hasta la Antártida.

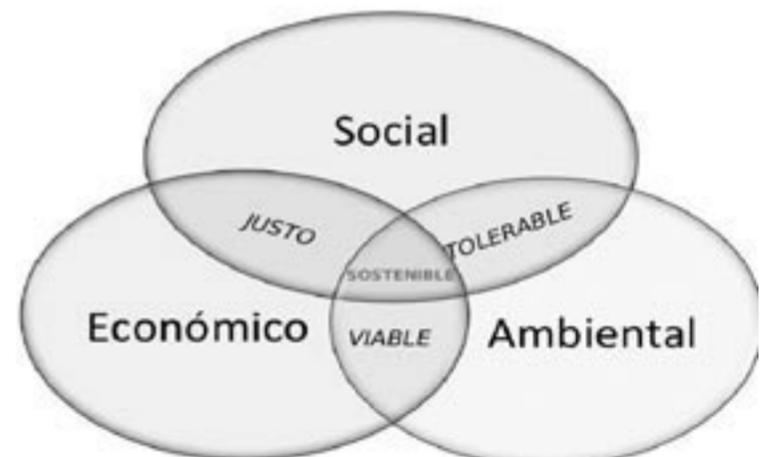
El método de patio fue desplazado por la cianuración. Desde finales del siglo XVIII se sabe que el oro y la plata son solubles en soluciones alcalinas de cianuro pero la utilización de este conocimiento a escala comercial sucedió hasta 1890. Tampoco las reacciones de este proceso se conocían cuando inició su uso industrial. El cianuro de sodio reacciona en presencia de oxígeno y agua con el oro o la plata de las rocas. En una reacción de óxido-reducción se forma un complejo soluble de oro y cianuro que hace posible su separación de las rocas. Para recuperar el oro, ahora disuelto en forma

de complejo, es necesario utilizar otro metal como el zinc que lo desplace del complejo transformándolo a su forma elemental, con lo que nuevamente se vuelve insoluble y puede ser separado por filtración. Un problema de este método es su baja selectividad, pues metales como el hierro y el cobre también reaccionan con el cianuro (ver referencia 4) El uso de este método ha generado gran controversia debido a su alta toxicidad. Los subproductos del proceso, cianatos y tiocianatos, persisten en el ambiente por varios años, contaminando ríos y aguas subterráneas. Se han desarrollado algunas metodologías de remediación cuyo objetivo es contrarrestar los efectos del cianuro transformándolo en compuestos menos tóxicos. Sin embargo, estudios recientes muestran que el cianuro residual atrapado en las minas puede provocar una fuga persistente de metales como el mercurio hacia cuerpos acuáticos. Este recorrido por la historia de la minería ofrece ejemplos claros de lo que no es sostenible en el sentido en que se ilustra en la figura 3. Hoy necesitamos un cambio de paradigma: debemos proyectar desde ahora el estado en que quedará el terreno minero al final de su explotación. No sólo

deben considerarse regulaciones más estrictas en esta materia sino también debe buscarse la eficiencia económica. Ésta requiere de métodos de extracción que reduzcan el costo de operación de las mineras, que aumenten la cantidad de metal recuperado; reduzcan la cantidad de agua utilizada y residuos producidos, y al mismo tiempo, la huella sobre el ambiente. Es allí donde el trabajo científico es indispensable para encontrar métodos alternativos. Una forma de hacerlo sería explorando la aplicación de nuevos descubrimientos en la química. Hace unos meses, se publicó un trabajo que podría abrir la puerta a un método de extracción y aislamiento eficiente de oro (ver referencia 5). Se encontró que las α -ciclodextrinas, anillos formados por unidades de azúcar, forman selectivamente superestructuras con derivados de oro. Es posible imaginar que a partir de este trabajo podrían aparecer tecnologías verdes para la recuperación de metales preciosos utilizando reactivos de bajo costo y ambientalmente benignos. Si bien, podríamos imaginar esta vía, es el trabajo de los químicos hacer de estas alternativas opciones viables para su utilización en minería sostenible.

Referencias:

1. D. A. Brading y H. E. Cross, Colonial Silver Mining: Mexico and Peru in *The Hispanic American Historical Rev.*, 52 4 (1972) 545-579
2. H. Sven, Lead Poisoning in a Historical Perspective. *American J. of Industrial Medicine* 38 (2005) 244-254
3. D. A. Johnson y K. Whittle, The chemistry of the Hispanic-American amalgamation process, *J. Chem. Soc., Dalton Trans.* 23 (1999) 4239-4243
4. J. O. Marsden y C. I. House, *The chemistry of gold extraction*. 2nd Ed. SME (2006). E.U.A.
5. Liu, Z. et al. Selective isolation of gold facilitated by second-sphere coordination with α -cyclodextrin. *Nat. Commun.* 4 (2013) 1855



3. Elementos que determinan la sostenibilidad de un proceso.