

Aportaciones de la UAM-I a la hidrometalurgia.

DRA. GRETCHEN LAPIDUS LAVINE*

RESUMEN:

Se presentan los avances que el grupo de Hidrometalurgia de la Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa ha logrado sobre la lixiviación selectiva de las distintas fases mineralógicas, mediante el estudio de su naturaleza química y la elección de medios específicos para la disolución de cada uno de los valores contenidos en ellas.

PALABRAS CLAVE: hidrometalurgia, minerales, lixiviación, cianuración, tiourea.

Nuestra sociedad moderna requiere de metales para moverse, comunicarse y lucirse. Metales base como el cobre, el plomo y el manganeso o los preciosos como el oro y la plata, se utilizan en la fabricación de casi todos los aparatos que conocemos y en otras muchas aplicaciones que ni soñamos, y las necesidades van en aumento. Sin embargo, extraerlos de la tierra es cada día más complicado y costoso porque los metales se encuentran en cada vez más bajas concentraciones, mineralógicamente encapsulados y en combinación con materiales de poco valor comercial.

Hasta la fecha el procesamiento de los minerales ha seguido rutas similares en todo el mundo: quebrado, molienda fina, flotación y fundición para los metales base o cianuración para los preciosos. Esta serie de pasos funciona eficientemente mientras las diferentes fases mineralógicas, que tienen uno o dos metales específicos, sean separables a un tamaño de partícula de alrededor de 100 micrómetros. Sin embargo, con el paso del tiempo, esta clase de menas está escaseando, quedando solamente aquellas cuyo tamaño de liberación (aquel que permite una separación eficaz de los metales) es muy pequeño. Esto provoca un excesivo gasto en molienda super-fina o bien la pérdida de los metales que no alcanzan a separarse del que más interesa.

Una solución conveniente a esta situación es contar con métodos más selectivos que sean capaces de extraer un metal dejando las demás fases mineralógicas intactas. De esta manera, el “residuo” puede seguir el tren de procesa-

ABSTRACT:

The group of Hydrometallurgy of the Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa present the progress they have achieved on the selective leaching of different mineralogical phases -by studying their chemical nature and the choice of specific means for dissolution of each of the values.

KEY WORDS: hydrometallurgy, minerals, leaching, cyanurization, thiourea.

miento tradicional o bien, sujetarse a otra etapa selectiva para la extracción de otros valores. Lo anterior implica que el nuevo método tenga que llevarse a cabo en condiciones relativamente suaves. La metalurgia extractiva con base en las disoluciones acuosas, mejor conocida como hidrometalurgia, puede operar en dichas condiciones, con las correspondientes limitantes. Se centra en la habilidad de determinados ligandos (o agentes complejantes) de formar especies metálicas, de preferencia selectivamente con el o los metales deseados, solubles en soluciones acuosas (lixiviación). El mejor ejemplo de ésta es el proceso de cianuración para extraer el oro y la plata de sus minerales, empleado desde hace 120 años en la industria mundial de los metales preciosos.

A pesar de la existencia de procesos hidrometalúrgicos para varios metales, la mayoría de ellos son tóxicos, poco selectivos o se llevan a cabo a presiones y temperaturas elevadas. Además, muchos de estos procesos generan cantidades elevadas de residuos que deben ser tratados antes de desecharse. Considerando lo anterior, la ruta hidrometalúrgica actual ofrece escasas o nulas ventajas en comparación de las pirometalúrgicas (fundición). Sin embargo, con los minerales de hoy en día se tienen que desarrollar procesos con una filosofía distinta: extraer selectivamente cada metal, uno por uno, en diferentes etapas de lixiviación para no tener que separarlos después de una lixiviación total. Adicionalmente, las soluciones utilizadas en las diferentes etapas deben poder reciclarse dentro del mismo esquema de procesamiento, bajando los costos de reactivos y tratamiento de residuos.

El grupo de hidrometalurgia de la UAM-Iztapalapa inició sus actividades en 1986, enfocando sus investigaciones a estudiar y optimizar los procesos existentes, así como

*DRA. GRETCHEN LAPIDUS LAVINE

Profesora del área de Hidrometalurgia del Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, UAM-Iztapalapa.
gtll@xanum.uam.mx

diseñar procesos innovativos menos contaminantes que privilegian la lixiviación y recuperación selectivas de metales a partir de sus minerales, a condiciones moderadas. La preocupación fundamental se originó por el uso casi universal del cianuro, sustancia tóxica, para extraer el oro y plata. Aunque la industria generalmente tiene controlado el manejo de dicho material y se encarga de su destrucción en los residuos, la utilización de cianuro causa inquietud en la sociedad por el temor a una contingencia. Por lo anterior, los proyectos iniciales versaron sobre la extracción y recuperación de plata y oro con procesos alternativos al de cianuro, empleando soluciones de tiourea.

Aunque la cianuración es un método probado desde finales del Siglo XIX, la tiourea es un compuesto con varias ventajas: se emplea en soluciones ácidas lo cual permite el uso de agentes oxidantes más fuertes que el oxígeno utilizado en la cianuración, es más selectivo para la extracción de oro y plata y, por lo anterior, es posible reciclar la solución pobre (ya sin plata y oro) a la etapa de lixiviación. Derivado de esto, la acidotioureación es efectiva para ciertos minerales que muestran refractariedad en soluciones de cianuro (los que experimentan preg-robbing y los sulfuros complejos). No obstante, también tiene desventajas que han limitado su implementación industrial: se requiere una concentración mucho más elevada que en el caso de los cianuros y se degrada con facilidad. Sin embargo, si fuera posible controlar la descomposición, el gasto en reactivos por la elevada concentración se disminuiría con la recirculación de la solución lixivante.

Para lograr lo anterior, fue necesario estudiar las características de la disolución de los metales preciosos encontrados en sus fases minerales en soluciones de tiourea, así como la destrucción de la misma en condiciones lixiviantes. Se evidenció la delicadeza de la solución, pero también las condiciones adecuadas para conservar el compuesto. Algunos años más tarde se aprovechó este conocimiento y una característica singular de la tiourea para hacer más eficiente la etapa de lixiviación y disminuir su consumo, ésta es la reversibilidad de su primera reacción de oxidación. Más adelante, se profundizará sobre este tema.

Aunado a lo anterior la lixiviación con tiourea no podría competir contra la cianuración sin bajar el requerimiento del reactivo, y esto depende directamente de la capacidad de recircular la solución, alterándola lo menos posible en cada paso. Esto implicaba encontrar maneras de remover selectivamente los valores lixiviados, excluyendo el gasto exorbitante en reactivos para precipitar todos los metales en solución, que además crearía problemas de separación después.

La primera opción considerada fue adsorber la plata en un sustrato sólido¹, para recuperar tanto oro como plata, se optó por la cementación² con aluminio metálico, porque

en teoría se requería menos de 0.1 kg de aluminio por cada kg de plata u oro. El problema fue que la capa protectora de óxido previno la cementación. Se diseñó entonces un aditivo para quitar dicha capa de óxido de aluminio³. Posteriormente, se descubrió la habilidad de algunas algas para adsorber metales pesados⁴. Entre la variedad de métodos implementados el mejor para ambos metales, oro y plata, seguía siendo la cementación con aluminio que además, deja la solución pobre en un estado adecuado para su recirculación.

Resuelto el problema de la recuperación de los metales preciosos, se investigaron más a fondo los agentes oxidantes, buscando uno "limpio" que no contaminara la solución lixivante ni que interfiriera en la etapa de cementación. Haciendo equipo con miembros del Área de Electroquímica del Departamento de Química (UAM-I), encabezado por el Dr. Ignacio González Martínez, se aprovechó la oxidación parcial reversible de la tiourea para, a su vez, oxidar las fases minerales de plata y oro, permitiendo su liberación de la matriz sólida y promoviendo su disolución. La innovación del grupo fue generar electrolytically y controladamente la tiourea oxidada para no utilizar un agente externo⁵. Además, con la misma electricidad se recuperaban el oro y la plata de la solución^{6,7}. Con este proceso integrado se podían lixiviar y recuperar los metales preciosos, y también recircular la solución lixivante hasta veinte veces⁸.

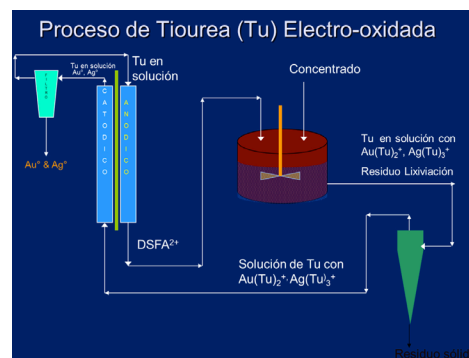


Figura: Proceso de Tiourea (Tu) Electro-oxidada

3. Mejoras al proceso de cementación de metales preciosos de soluciones de tiourea con aluminio". Lapidus Lavine, G.T, Teutli-Leon, M.M.M. y González, I. Patente Mexicana 178447, 1995.
4. "Recuperación selectiva de oro de soluciones de bromuros por adsorción en biomasa" Lapidus Lavine, G.T, Vargas-Mora, V. Patente Mexicana 209919, 2002.
5. "Mejora al proceso de lixiviación de plata y oro con soluciones de tiourea". Lapidus Lavine, G.T, López Escutia, M.C y Oropeza-Guzmán, M.T. Patente Mexicana MX 250,894, 2007-
6. Proceso de lixiviación y recuperación de plata y oro con soluciones de tiourea electro-oxidada". Lapidus Lavine, G.T., López Escutia, M.C., Oropeza-Guzmán, M.T., González I., Rodríguez-Hernández, F., Poisot-Díaz, M.E. y Girón-Bautista, I. Patente Mexicana MX 251,047, 2007
7. "Mejora al proceso de lixiviación de plata y oro con soluciones de tiourea". Lapidus Lavine, G.T., López Escutia, M.C., Oropeza-Guzmán, M.T., González I., Rodríguez-Hernández, F., Poisot-Díaz, M.E. y Girón-Bautista, I. WO/2005/028687
8. "Mejora al proceso de lixiviación y recuperación de plata y oro con soluciones de tiourea electro-oxidada". Nava-Montes de Oca, J.L., Recendiz-Medina, A., Rive-

1. Proceso para la recuperación selectiva de plata de soluciones tiouréicas empleando arcillas naturales". Lapidus Lavine, G.T y Rosas-Cedillo, J.R. Patente Mexicana 176594, 1994

2. Tratamiento termoquímico

Paralelamente con el proceso de tiourea, realizamos investigación sobre otros sistemas para la extracción de oro y, sobre todo, la plata. En los años finales del Siglo XX, el precio de los metales preciosos era sumamente bajo (alrededor de los \$5 y \$350 USD por onza troy de plata y oro, respectivamente, comparado con los \$20 y \$1,300 USD en 2014). Esta situación ocasionó que la industria internacional no tuviera aliciente para buscar nuevos procesos y, fuera de México, ni siquiera interés por la plata. Por fueron las universidades, sobre todo las mexicanas, las que investigaron los principios de la cianuración de la plata y sistemas innovativos menos contaminantes. Se abarcó también el estudio de los mecanismos de lixiviación como parte del esfuerzo de buscar condiciones óptimas tanto con cianuro (método tradicional), como con tiourea y tiosulfato. Se desarrollaron modelos matemáticos basados en los fenómenos que ocurren en el proceso de lixiviación.

Los primeros años del Siglo XXI vieron incrementos históricos en los precios de los metales preciosos, y con ello la disposición de la industria de invertir en procesos nuevos, menos contaminantes. La selectividad para extraer el oro y la plata a partir de minerales complejos, refractarios y combinados con hierro, plomo y zinc cobró mayor importancia, debido a que los precios de los metales base no subieron con el mismo furor que el de los preciosos. Además, los elevados costos de energía empezaban a pesar sobre la pirometalurgia. Lo anterior, despertó el interés de extraer el oro y la plata casi quirúrgicamente de sus matrices mineralógicas –las que podrían procesarse posteriormente, cuando los precios generales de los metales mejoraran–.

La industria empezó a apoyar los esfuerzos de las universidades para buscar sistemas alternativos al cianuro, principalmente tiourea y tiosulfato. Como consecuencia de este financiamiento se desarrolló, a nivel semi-piloto, el proceso basado en la electro-oxidación parcial de la tiourea y se lograron grandes avances en la implementación del conocimiento acerca de las limitaciones y los aciertos para el sistema del tiosulfato^{9,10,11,12}. Hoy en día los sistemas tanto de tiosulfato como de tiourea constituyen procesos de nicho en aquellos casos donde la cianuración no funciona adecuadamente, han mostrado ser lixiviantes muy efectivos y generando procesos redituables para múltiples aplicaciones.

A la par con las investigaciones sobre plata y oro, se ampliaron los estudios hacia otros minerales refractarios, ahora con los metales base, específicamente cobre, plomo y manganeso. En 2006, se inició un estudio sobre la extracción del cobre contenido en una fase denominada calcopirita (CuFeS_2), el mineral que compone más del 70% de las reservas mundiales de cobre. Dicho metal es muy difícil de extraer bajo las condiciones normales de procesamiento (oxidativas) por una capa protectora que se forma, impidiendo el paso de reactivos y del cobre disuelto desde y hacia la solución lixivante, respectivamente. El problema que surgía es que se requieren condiciones extremas para romper esta capa protectora¹³. No obstante, se empezó a trabajar alrededor de un hecho que los electroquímicos habían descubierto: si se sujetaba a un tratamiento reductivo previo, la calcopirita se transformaba en fases mucho más fáciles de lixiviar. Hubo intentos por parte de otros investigadores en años anteriores, pero ninguno resultó técnica ni financieramente viable.



Calcopirita

Fuente: materialesde.com

Siendo los minerales sulfurados semiconductores, entre ellos la calcopirita, se dedujo que se podía lograr la reducción necesaria mediante la aplicación de corriente a una lechada de partículas minerales. Dicho tratamiento se nombró “reducción electro-asistida”. Es un tratamiento que sólo afecta a las fases reductibles (o sea de cobre y plata), dejando las demás intactas para procesamiento posterior¹⁴. Más adelante en la investigación nos dimos cuenta que se podría disminuir el tiempo y la cantidad de electricidad sustancialmente si se agregaban ciertos aditivos a la solución de electro-reducción¹⁵.

Con los resultados del laboratorio, se infirió el mecanismo de la transformación y, posteriormente, se elaboraron los diseños posibles para reactores a nivel piloto. Simultáneamente, se realizaron pruebas para encontrar las mejores condiciones de las etapas subsecuentes del proceso: la lixiviación oxidativa y electrodeposición del cobre y la electrólisis de hierro, todas a temperatura ambiente.

En la misma línea de la reducción electro-asistida, se vislumbraron otras aplicaciones con materiales distintos, materiales que son conductores. Se comprobó que era posible liberar el zinc de las ferritas (ZnFe_2O_4) formadas en el tostado de concentrados minerales y a las mismas condiciones empleadas para la transformación de la calcopirita. Los lodos de dióxido de manganeso (pirolusita) mineral

ra-Iturbe, F.F., Lapidus Lavine G.T., Martínez, I., Benavides-Pérez, R. y Lara-Valenzuela C. Solicitud MX/a/2008/003249, 2008

9. “Reactor de lixiviación de plata para soluciones que saturan”. Buendía Cachú, ED., Lapidus Lavine G.T. y Vargas mOra, V., Patente Mexicana 209919, 2004.

10. “Mejora al proceso de lixiviación de plata de soluciones de tiosulfato de cobre”. Lapidus Lavine, G.T., Alonso Gómez A.R., Cervantes Escamilla, J.A., Mendoza Muñoz P. y Ortiz García, M.F. Patente Mexicana MX 257,151, 2008.

11. “Electrorecuperación de oro y plata a partir de soluciones de tiosulfato” Alonso Gómez A.R. y Lapidus Lavine G.T. Patente otorgada, 2014 (solicitud de PCT/MX2011/000150)

12. “Electrorecuperación de oro y plata a partir de soluciones lixiviantes mediante depósito catódico y anódico simultáneo”. Alonso Gómez A.R. y Lapidus Lavine G.T. Patente solicitada, MX/a/2010/013717, (PCT/MX2011/000151), 2010

13. Un sulfuro no estequiométrico

14. “Proceso para la recuperación del cobre a partir de minerales y menas de sulfuros”. Lapidus Lavine, G.T. y Doyle, F.M. Patente solicitada PCT/US08/54661 (WO/2008/103873), 2008

15. “Proceso para la lixiviación de cobre y plata a partir de menas de fases minerales refractarias que contienen hierro y azufre”. Patente solicitada, 2010

y de pilas alcalinas sujetos a un procedimiento reductivo, liberan al ion manganeso¹⁶. Además, algunas de las fases refractarias de plata también responden a ese pretratamiento.

Regresemos al tema de la calcopirita; como se mencionó arriba, las técnicas hidrometalúrgicas propuestas provocan la formación de una capa que impide la extracción del cobre. Ya se comentó que una de las maneras de atacar este inconveniente es aplicar un método reductivo para transformar la calcopirita a fases menos refractarias. Para facilitar el procesamiento, se buscó evitar la formación de la capa pasivante mediante el empleo de un medio alternativo. Para ello era importante conocer la naturaleza química de la capa formada; de nuevo, la colaboración con los electroquímicos era primordial. Aunque había y todavía hay mucha discusión alrededor de este tema, los científicos del Área de Electroquímica tuvieron argumentos convincentes, basados en su investigación, que orientaron nuestra búsqueda.

Para comenzar se utilizaron técnicas electroquímicas para evaluar y seleccionar las soluciones y aditivos que cumplieran el propósito. Posteriormente, se optimizaron los otros parámetros en la lixiviación, logrando disminuir sensiblemente la temperatura y el tiempo para la extracción de cobre tanto de menas como de concentrados que contienen calcopirita¹⁷.

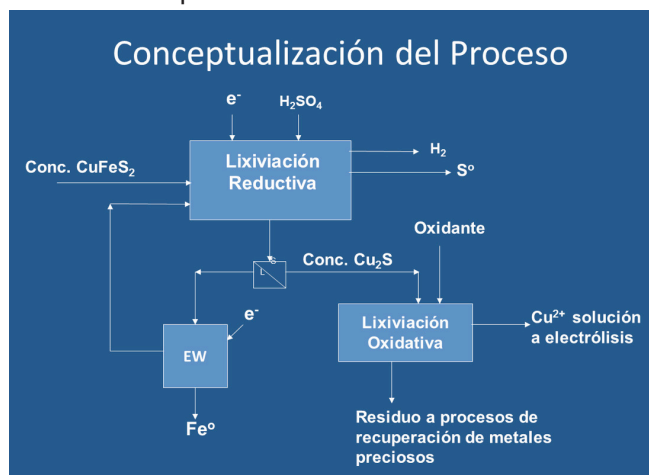


Figura: Conceptualización del proceso

Otras de las fases refractarias que han retado a los investigadores en hidrometalurgia es el sulfuro de plomo (galena). El problema con este mineral es que el ion plomo posee una tendencia a formar sólidos insolubles en la presencia del ion sulfato o, como casi todos los metales, del hidróxido. El panorama se complica considerando que la galena requiere la oxidación del ion sulfuro a azufre ele-

mental (2 electrones por mol de galena) para liberar el ion plomo; sin embargo, a condiciones más oxidantes, el azufre se convierte en sulfato (6 electrones más por mol de galena). Agregando un agente complejante fuerte y selectivo para el plomo, se logra disolver a este metal, pero el agente debe ser muy selectivo y poseer características que sean compatibles con el método de recuperación y recirculación de la solución lixivante. La búsqueda, mediante consideraciones termodinámicas, y la optimización de los parámetros produjeron un sistema que no sólo sirve para el plomo en minerales, sino que también es adecuado para el reciclaje de acumuladores de plomo ácido y otros materiales de desperdicio que contengan dicho metal.

Reciclaje

La reutilización de metales contenidos en productos caducados o que constituyen un peligro para el medio ambiente ha cobrado importancia en la sociedad moderna. Más aún, normalmente dichos metales se encuentran en materiales de desecho en concentraciones muy superiores a las que ocurren en la naturaleza. Sin embargo, muchas veces están combinados con otros elementos que dificultan su disolución o se encuentran recubiertos de plásticos o cerámicos vidriados inertes a los agentes lixiviantes. Por lo anterior, su rescate constituye retos distintos a los enfrentados con minerales.

Por ejemplo, el conocido “e-waste” o basura electrónica tiene contenidos elevados de metales base y preciosos, especialmente cobre. La cantidad de teléfonos celulares, tablets y computadoras comprados, y eventualmente desechados, así como las pilas que los impulsan, va más allá de lo que hubiéramos podido predecir hace pocos años y aumenta cada día. Actualmente, la industria de reciclaje se concreta a separar los plásticos y fundir los demás componentes para separar cada metal posteriormente. Resulta mucho más eficiente diseñar un tren de procesamiento para llevar a cabo lixiviaciones selectivas, seguidas por su recuperación en etapas separadas. En el grupo se ha investigado con éxito tanto la disolución como la recuperación selectivas de diferentes tipos de e-waste y pilas, tanto primarias (alcalinas) como secundarias (recargables), para separar y recuperar compuestos metálicos de cobre, níquel, cobalto, manganeso, zinc, oro, plata y los elementos de tierras raras. Estos últimos son de especial importancia dado que actualmente China produce el 99% de la demanda mundial y la posibilidad de reciclarlos abre un mercado enorme en el ámbito internacional.

Las áreas más recientes en que ha incurrido el grupo de investigación son las relacionadas con la obtención de los elementos del grupo del platino (PGE, por sus siglas en inglés) y los actínidos (torio y uranio) a partir de sus minerales. En ambos casos, los tratamientos actuales son netamente hidrometalúrgicos, pero a condiciones de pH y temperatura severas, destruyendo la matriz mineral y generando grandes cantidades de residuos tóxicos. Dada la experiencia del grupo con la lixiviación de minerales refractarios, se han estado investigando los aditivos, oxidan-

16. “Proceso de lixiviación y recuperación simultáneas de dióxido de manganeso en una celda electrolítica”. Lapidus Lavine G.T. y Gutiérrez Muñoz, M. Patente solicitada, MX/a/2013/008030), 2013

17. “Medio para la Lixiviación de Cobre de Minerales Refractarios”. Lapidus Lavine G.T., Solís Marcial, O.J. Patente solicitada, MX/a/2010/013713 (PCT/MX2011/000154) WO/2012/081953, 2010.

tes (limpios) y parámetros de las soluciones indicadas para vencer la barrera de la estabilidad de las fases minerales. Hasta el momento, se ha logrado extraer selectivamente en el laboratorio la mayor parte de los PGE y los actínidos de concentrados provenientes de diferentes lugares en el mundo. Consecuentemente, se sigue avanzando también en estos proyectos.

Perspectivas hacia el futuro

Es importante remarcar que existe una riqueza enorme de metales en aquellos minerales clasificados como complejos e inadecuados para procesamiento mediante las vías tradicionales. No obstante, hay métodos alternativos que se están investigando, aplicables a dichas menas. Se clasifican como técnicas hidrometalúrgicas que incluyen la disolución de los valores en medios acuosos y su posterior recuperación. Aunque las vías hidrometalúrgicas han existido desde hace mucho tiempo, no se han implementado para las menas sulfuradas y complejas, debido a que la composición de los medios comúnmente utilizados, ácidos o bases inorgánicos, no es suficientemente selectiva para tratar económicamente este tipo de minerales.

Como se ha visto, el grupo de Hidrometalurgia de la Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa ha avanzado con un enfoque relativamente novedoso de lixiviación selectiva de las distintas fases mineralógicas, mediante el estudio de su naturaleza química y la elección de medios específicos para la disolución de cada uno de los valores contenidos en ellas. De esta manera, ha sido posible extraer los metales de ciertas fases problemáticas contenidas en menas o concentrados complejos en condiciones moderadas, de tal forma que se permitiría procesarlos posteriormente por un tratamiento tradicional, o bien, diseñar un esquema de etapas para disolver y recuperar cada uno de los diferentes valores. Una parte integral de esta metodología es la inclusión de las etapas de recuperación y reutilización de las soluciones, mediante la recirculación.

A pesar de los avances logrados para la disolución y recuperación de los distintos minerales, hace falta sistematizar e integrar el conocimiento, aplicándolo al tratamiento de concentrados multimetálicos y multifásicos. Con esta comprensión generalizada, sería posible diseñar procesos para aprovechar menas y materiales residuales que actualmente no se están explotando y, en algunos casos, son considerados residuos peligrosos. En particular, el interés se centra en minerales y residuos de cobre, plomo, zinc y plata, con elevados contenidos de hierro, para recuperar los valores metálicos de una manera selectiva y amigable con el entorno. En el mundo del reciclaje, además, existen cuantiosas oportunidades de aplicar las técnicas empleadas en la hidrometalurgia. Finalmente, para abordar estos retos, es necesario recurrir a la termodinámica y al modelado para entender, predecir y diseñar procesos eficientes y sustentables.

Comentarios finales

En México, como en la mayor parte del mundo, es difícil conseguir financiamiento para desarrollar procesos que cambien paradigmas, especialmente para las etapas post-laboratorio. No obstante, a lo largo de los años de innovación, continuamente hemos contado con el apoyo casi incondicional tanto de las autoridades en turno como del personal administrativo; sin este ambiente de flexibilidad y cooperación en la UAM-I, no se hubieran alcanzado los logros descritos arriba. Por mi laboratorio han pasado varias generaciones de alumnos entusiastas y ávidos de aprender que han convertido la labor de investigación y docencia en un compromiso fundamental.

Semblanza de la autora.

La Dra. Gretchen Lapidus Lavine comenzó su aventura en la UAM-I, cuando las dos estaban empezando (1975). Tardó un poco para encontrar su vocación en el área de Hidrometalurgia, que combina termodinámica de soluciones, con fenómenos de transporte e ingeniería de reacciones. Hizo su debut en el aspecto de modelado fenomenológico que es una pequeña sub-área del campo. A partir de la terminación de su tesis doctoral en la UAM-I (1991), incursionó en la investigación sobre lixiviación selectiva y las subsecuentes operaciones unitarias. Con la ayuda constante y colaboración de su colega, el Dr. Ignacio González Martínez del Departamento de Química, se ha construido una línea de investigación reconocida internacionalmente.

A continuación una lista con sus artículos más representativos en el tema de hidrometalurgia:

- Lapidus, G. T. (1992), "Mathematical Modelling of Metal Leaching in Non-Porous Minerals", *Chemical Engineering Science*, 47, pp. 1933-41.
- Doyle, F.M. y Lapidus, G.T. (2007), "Aqueous Processing for Environmental Protection" (chapter 10) en *Environmentally Conscious Material and Chemical Processing*, Ed. M. Kutz, John Wiley, ISBN: 0-471-73904-9, pp. 279-305.
- Lapidus, G.T., González, I., Nava, J.L., Benavides, R y Lara-Valenzuela, C. (2008), "Integrated Process for Precious Metal Extraction and Recovery based on Electro-oxidized Thiourea", *Hydrometallurgy* 2008, Eds. C.A. Young, P.R. Taylor, C.G. Anderson y Y. Choi, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. (SME), Littleton, Colorado, U.S.A., ISBN: 978-0-87335-266-6, pp. 837-842.
- Solis-Marcial, O.J. y Lapidus, G.T. (2013), "Improvement of Chalcopyrite Dissolution in Acid Media using Polar Organic Solvents", *Hydrometallurgy*, 131-132, 120-126.
- Mesa-Espitia, S.L. y Lapidus, G.T. (2015), "Pretreatment of a refractory arsenopyritic gold ore using hydroxyl ion", *Hydrometallurgy*, 153, pp. 106-113.
- Zárate-Gutiérrez, R., Gregorio-Vázquez, L. y Lapidus, G.T. (2015), "Selective Leaching of Lead from a Lead-Silver-Zinc Concentrate with Hydrogen Peroxide in Citrate Solutions", *Canadian Metallurgical Quarterly*, 54(3), pp. 305-309.