

Caracterización de jales mineros para recuperación de elementos estratégicos (Ga, In, Ge y tierras raras)

Macías Macías Karen Y., Ceniceros Gómez Agueda Elena*, Gutiérrez Ruiz Margarita E.

Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Ciudad Universitaria, Av. Universidad No. 3000, Coyoacán, Cd. de México. C.P. 04510. México

*Autor para correspondencia: aguedaceniceros@yahoo.com

Recibido:

28/abril/2016

Aceptado:

25/julio/2016

Palabras clave

Jales, elementos estratégicos, tierras raras

Keywords

Mining-residue, strategic-elements, rare-earths

RESUMEN

Se realizó la caracterización fisicoquímica, mineralógica y elemental de 3 muestras distintas de jales mineros, procedentes de la explotación tanto de minerales de hierro como de minerales polimetálicos, con el fin de evaluar la posibilidad de recuperación de elementos estratégicos como Ga, In, Ge y/o tierras raras para su posible uso en la fabricación de nuevos materiales. La caracterización mineralógica se llevó a cabo por Difracción de Rayos X (DRX) y Microscopía Electrónica de Barrido con análisis de Energía Dispersiva de rayos X (MEB-EDS). La caracterización elemental se realizó por diversas técnicas: Espectroscopia Óptica de Emisión por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) y acoplado a un Espectrofotómetro de Masas (ICP-MS), Fluorescencia de Rayos X (FRX), y por Análisis Instrumental de Activación de Neutrones (INAA). Los resultados indicaron que los elementos mayoritarios (>100 mg/kg) presentes en las muestras son Fe, Zn, Pb y Cu, los cuales aumentan su concentración con la disminución del tamaño de partícula. Los elementos estratégicos encontrados fueron Ga, Y, La, Ce, Nd y Sc en concentraciones de 5 a 32 mg/kg. Se descubrió también la presencia de Au (2.1 mg/kg) en una de las muestras en partículas menores a 250 µm.

ABSTRACT

The physicochemical, mineralogical and elemental characterization of 3 different samples of mining residues from the exploitation of both iron ores and polymetallic minerals was done in order to evaluate the possibility of recovery of strategic elements, like Ga, In, Ge and/or rare earth elements (REE) for its possible use in the manufacture of new materials. The mineralogical characterization was carried out by X-ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray analysis (SEM-EDS). The elemental characterization was performed by diverse methods: Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry with optic detector (ICP-AES) and with a Mass Spectrometer detector (ICP-MS), X-ray Fluorescence (XRF), and Instrumental Neutron Activation Analysis (INAA). The results indicated that the major elements (>100 mg/kg) in the samples are Fe, Zn, Pb and Cu, and their concentration increase with decreasing particle size. The strategic elements found were Ga, Y, La, Ce, Nd and Sc in concentrations from 5 to 32 mg/kg. It was also found the presence of Au (2.1 mg/kg) in one of the samples in particles less than 250 µm.

Introducción

Los elementos estratégicos son aquellos que son esenciales para la fabricación de nuevas tecnologías, por lo tanto, tienen un gran valor económico para la industria aeroespacial, automotriz y electrónica principalmente (Estudio de la Comisión Europea, 2010).

Elementos como el galio e indio son utilizados en la industria de semiconductores, también se utilizan para fabricar diodos LED de distintos colores, además de diodos láser. Tienen aplicaciones para la fabricación de pantallas de cristal líquido (LCD), espejos y paneles solares, aleaciones (de Ga e In) de bajo punto de fusión, lo cual indica que son líquidas a temperatura ambiente permitiendo su uso en termómetros que sustituyan a los fabricados con mercurio (Habashi, 1997). El germanio es utilizado como material conductor en transistores, como óxido sirve para aumentar el índice de refracción de vidrios, lo que lo hace útil en la fabricación de anteojos y lentes para microscopio o cámaras fotográficas, se utiliza también para crear aleaciones para lámparas fluorescentes (Mastalerz y Drobniak, 2012).

Por otra parte, las tierras raras (grupo de los lantánidos más itrio y escandio) han empezado a tener gran importancia en la producción de materiales de alta tecnología, sin embargo, como no se encuentran yacimientos con grandes cantidades de estos elementos, es de mucha importancia comenzar a considerar otras fuentes de donde extraerlos (Dodson et al., 2012).

La demanda de algunos de estos elementos estratégicos ha aumentado y continuará aumentando a causa del fuerte crecimiento económico en diferentes partes del mundo, y la materialización de un suministro eficiente podría presentar dificultades debido a la necesidad de extraer las menas a grandes profundidades, con concentraciones más bajas de los metales y más complejas (Schlömann, 2016). Por lo que es necesario considerar otras alternativas de obtención de dichos elementos, que evite la sobreexplotación de las minas.

Se ha encontrado que estos elementos se pueden recuperar a partir de los residuos que generan tanto la industria electrónica como la industria minera en el beneficio de otros metales como Fe, Zn, Pb y Cu (Wood y Samson, 2006). Los métodos de obtención de metales estratégicos más utilizados son la electrólisis y la extracción con disolventes (Gupta et al., 2007a, Gupta et al., 2007b).

La industria minera en México ha producido y seguirá produciendo grandes cantidades de residuos mineros, los cuales pueden tener un gran potencial para generar ganancias económicas si se logran obtener de ellos ciertos elementos de interés industrial. Por lo que el presente proyecto tiene por objetivo la caracterización de 3 jales mineros de hierro y polimetálicos con énfasis en la determinación de los elementos estratégicos y tierras raras.

Metodología

Preparación de muestras

Se obtuvieron 3 muestras de jales mineros, 2 de una zona minera de Taxco de Alarcón, Guerrero y una de Lázaro Cárdenas, Michoacán (tabla 1).

Tabla 1. Claves y sitios de procedencia de las muestras de residuos mineros.

Muestra (clave de campo)	Clave	Lugar de procedencia	Color
Jal no oxidado	446-15	Taxco, Gro.	Café oscuro
Jal oxidado	447-15	Taxco, Gro.	Amarillo
Jal compuesto	1271-13	Lázaro Cárdenas, Michoacán.	Gris

Se colocaron las muestras de residuos en charolas de plástico durante 48 horas para su secado al aire, y su posterior cuarteo (homogeneizado) y almacenamiento en bolsas de plástico.

Caracterización fisicoquímica

Medición de pH y conductividad eléctrica

Se siguió el método EPA 9045D para la determinación de pH en suelos y residuos, con el fin de conocer las características fisicoquímicas de las muestras.

Se pesaron 20 g de cada muestra, se les agregó 60 mL de agua desionizada y se pusieron en agitación orbital durante 5 min. a 240 rpm. Posteriormente se dejaron en reposo durante una hora y se les midió el pH con un potenciómetro marca Thermo Scientific Orion Star A211 y la conductividad eléctrica se midió con un conductímetro marca Corning 441.

Caracterización mineralógica

Determinación de porcentaje de tamaño de partícula presente en las muestras

Se realizó el tamizado de las muestras utilizando tamices de malla 100 y 250 durante 40 minutos para obtener el % de 3 diferentes tamaños de partícula para

cada muestra (a: > malla 100, b: malla 100 y c: malla 250). Se calcularon los porcentajes correspondientes para cada tamaño de partícula presentes en las muestras, con el fin de encontrar el tamaño predominante en cada una y para investigar si existe una relación entre el tamaño de partícula de las muestras y la concentración de cada elemento.

Análisis por DRX y MEB-EDS

Las muestras de menor tamaño de partícula (c) fueron pulverizadas y enviadas a la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación USAI de la Facultad de Química, UNAM para su análisis por Difracción de rayos X (DRX).

El análisis de las muestras en sus 3 tamaños de partícula se realizó en un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) marca Hitachi TM-1000.

Análisis elemental

Digestiones ácidas parciales asistidas por horno de microondas para ICP-OES y ICP-MS

Se pesaron aproximadamente 0.2 g de cada muestra en una balanza analítica marca Ohaus Discovery, en su tamaño de partícula mayor y menor (a: > malla 100 y c: malla 250). Posteriormente se colocaron en los recipientes (liners) agregando 10 mL de HNO₃ conc. Se siguieron los controles de calidad establecidos en el laboratorio: en total se colocaron en el horno de microondas 6 muestras problema, 1 muestra duplicada, 1 blanco (HNO₃ conc.) y un blanco adicionado (2 mL de una disolución patrón de 25 µg/mL de Ga, In, Ge y tierras raras).

Se colocaron en un horno de microondas marca Ethos Easy con el siguiente programa de calentamiento: rampa de temperatura hasta 175°C con mantenimiento durante 4.5 min. y con un tiempo de enfriamiento de 30 min. Posteriormente se filtraron con papel Whatman No. 40 y se aforaron con agua desionizada en matraces aforados de 25 mL para su posterior análisis por ICP-OES. Para ICP-MS únicamente se analizaron las muestras de mayor tamaño de partícula (a: > malla 100).

La digestión ácida en horno de microondas se realiza con el fin de destruir, parcial o totalmente, la matriz en la que se encuentran los elementos de interés, esto nos permite solubilizar la mayor cantidad de elementos presentes en las muestras para su cuantificación por las diferentes técnicas espectroscópicas.

Análisis cualitativo por Fluorescencia de Rayos X (FRX)

Se analizaron los 3 diferentes tamaños de partícula de las 3 muestras, por fluorescencia de RX con un equipo Thermo Scientific Niton FXL en modo "suelo" y modo "mina". El equipo nos da un barrido de una gran cantidad de elementos presentes en cada muestra sin necesidad de darles un tratamiento previo y no es una técnica destructiva, por lo que las muestras quedan intactas para realizar más análisis con ellas.

Análisis cuantitativo por Activación de Neutrones con Digestión total de elementos (INAA/TD-MS)

Las muestras fueron analizadas en Canadá por Activation Laboratories Ltd., para el barrido total de elementos por medio de una digestión total con 4 ácidos: HNO₃, H₂SO₄, HClO₄ y HF para el análisis por Activación de Neutrones (INAA/TD-MS).

Resultados y discusión

Caracterización fisicoquímica

Los resultados de la caracterización fisicoquímica se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados de parámetros fisicoquímicos medidos de las muestras de residuos mineros.

Muestra	pH	Conductividad (µS/cm)
446-15	7.84	368
447-15	7.91	332
1271-13	7.83	676

Las muestras en general presentaron valores de pH ligeramente básicos (7.8-7.91). La muestra de Michoacán (clave 1271-13) fue la que presentó la mayor conductividad, esto quiere decir que es la que tiene mayor contenido de sales que al disolverse conducen la electricidad.

Caracterización mineralógica

Tamaños de partícula, análisis por MEB-EDS y DRX

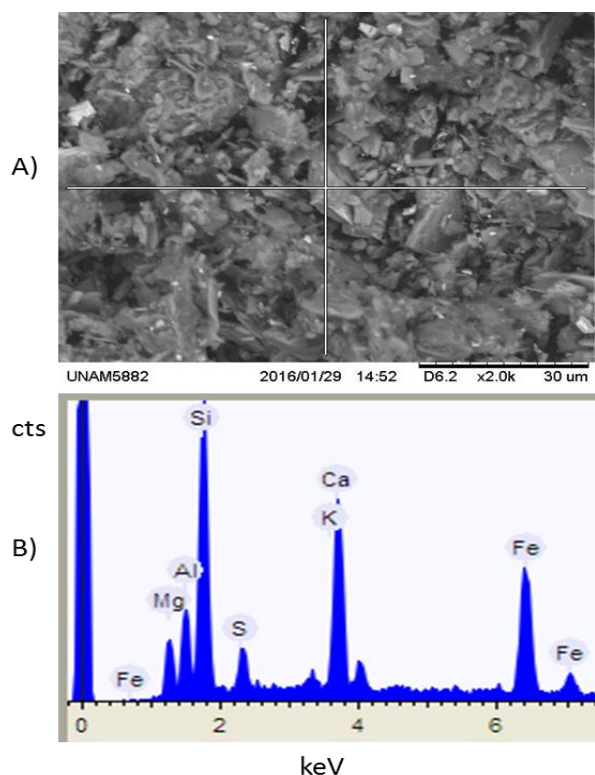
La distribución de tamaños de partícula de los 3 jales analizados se presenta en la tabla 3.

Las muestras de Taxco presentaron mayor tamaño de partícula (a: > 100), mientras que la muestra de Michoacán (clave 1271-13) se presentó en mayor proporción en un tamaño de partícula intermedio (b: entre 100 y 250 micras). Esto quiere decir que las muestras en general están compuestas por partículas de tamaño mayor o igual a 100 micras.

Tabla 3. Contenido en porcentaje de diferentes tamaños de partícula presentes en cada muestra.

Muestra	446-15	447-15	1271-13
	%		
a: > malla 100	63.71	86.20	30.95
b: Tamiz malla 100	28.91	10.69	54.21
c: Tamiz malla 250	7.37	3.11	14.84

En los análisis de MEB-EDS (figura 1) se observó en todos los casos que en su mayoría se encontraron partículas de tamaños entre 3 y 30 μm con algunas formas definidas.


Figura 1. A. Muestra 1271-13 por MEB-EDS con 2000 aumentos. B. Análisis elemental.

Sin embargo, el análisis tanto de las partículas más pequeñas como de las grandes mostró que los elementos predominantes son Si, Al, Ca, K y Fe. Estos elementos son propios de las arcillas, las cuales de manera general se presentan en los jales ya que se trata de residuos. Adicionalmente, se encontró por DRX el hierro presente en las muestras se encuentra principalmente como pirita (FeS_2), Ferro-actinolita ($\text{Na,CaMgMnFe}_{3.2}\text{Al}_{10.03}\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$)_e_Hidroniojarosita: $\text{K}_{0.35}(\text{H}_3\text{O})_{0.65}\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ (tabla 4).

Conocer qué minerales están presentes en las muestras nos da información sobre el método de lixiviación a elegir con algún agente oxidante o reductor, según sea la naturaleza de la muestra, para posteriormente extraer los elementos de los que se tenga interés. También es importante conocer qué elementos pueden interferir al momento de realizar las extracciones de los elementos elegidos (Harbuck, 1992).

Tabla 4. Arcillas presentes en las muestras. Resultados DRX.

Muestra	Minerales presentes
446-15	Cuarzo: SiO_2 Brushita: $\text{CaPO}_3(\text{OH}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Calcita: $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ Pirita: FeO_2 Albita: $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ Clinochlore: $(\text{Mg,Fe,Al})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ Hidroniojarosita: $\text{K}_{0.35}(\text{H}_3\text{O})_{0.65}\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
447-15	Calcita: $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ Yeso: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Ferro-actinolita: $\text{Na}_{0.04}\text{Ca}_{1.8}\text{Mg}_{1.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Fe}_{3.2}\text{Al}_{10.03}\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_{1.9}$ Hidroniojarosita: $\text{K}_{0.35}(\text{H}_3\text{O})_{0.65}\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
1271-13	Cuarzo: SiO_2 Clinochlore: $(\text{Mg,Fe,Al})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ Calcita: $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ Pirita: FeO_2 Ferro-actinolita: $\text{Na}_{0.04}\text{Ca}_{1.8}\text{Mg}_{1.9}\text{Mn}_{0.1}\text{Fe}_{3.2}\text{Al}_{10.03}\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_{1.9}$ Albita: $(\text{Na,Al})\text{Si}_3\text{O}_8$

Análisis elemental

El análisis semi-cuantitativo por FRX mostró que los metales que se encontraron en mayor proporción en las muestras son el Fe y el Zn, ya que los jales son procedentes del beneficio de estos dos metales principalmente, sin embargo, también se encontraron cantidades importantes de Cu y Pb (tabla 5)

Tabla 5. Resultados cualitativos de metales por FRX para 3 muestras en los 3 diferentes tamaños de partícula (a, b y c).

Muestra	Zn	Cu	Pb	Fe
Tamaño de partícula	mg/kg			
a: > 100 micras				
b: entre 100 y 250 micras				
c: < 250 micras				
446-15a	6484.4	158.2	535.47	193446
446-15 b	6831.6	131.8	947.27	509232
446-15 c	8449.6	191.9	1635.81	649015
447-15 a	979.5	45.9	3010.22	40191
447-15 b	1362.6	65.1	4922.59	57469
447-15 c	2032.1	148.7	7720.65	91347
1271-13 a	<LD	1361.2	6.88	40191
1271-13 b	<LD	1519.1	8.70	57469
1271-13 c	<LD	1691.5	8.15	91347

Es de gran importancia identificar a los elementos mayoritarios, ya que éstos podrían interferir al momento de realizar los análisis y ensayos de recuperación de los elementos que se encuentren en menores proporciones.

Dentro de los resultados de FRX se pudo observar un aumento en la concentración de los elementos mayoritarios (Fe, Cu, Pb y Zn) conforme disminuía el tamaño de partícula, lo cual se confirmó al realizar el análisis de los mismos elementos por ICP-OES para las muestras de menor y mayor tamaño de partícula (tabla 6). Se encontró que las concentraciones para las muestras de menor tamaño (c) fueron mayores que para las muestras de mayor tamaño de partícula (a). No se logró determinar la presencia de elementos estratégicos y/o tierras raras por estos dos métodos.

Tabla 6. Resultados cuantitativos por ICP-OES: 3 muestras en dos tamaños de partícula (a y c).

Muestra	Zn	Cu	Pb	Fe
Tamaño de partícula	mg/kg			
a: > 100 micras c: < 250 micras				
LD	0.01	0.01	0.02	0.01
446-15 a	1141.82	74.840	1922.79	42970.89
446-15 c	4000.30	126.397	1127.97	98932.66
447-15 a	671.52	32.101	1930.55	22452.81
447-15 c	1447.60	68.023	5429.42	47882.24
1271-13 a	59.64	1216.638	16.03	67147.16
1271-13 c	65.68	1544.026	13.98	73121.21

Para la cuantificación de elementos estratégicos y tierras raras se implementó la técnica de ICP-MS con digestión parcial de las muestras de tamaño de partícula mayor, con la cual se identificó que la muestra que presentó concentraciones más altas de estos elementos fue la de Michoacán (clave 1271-13), ya que se encontraron concentraciones de 4.8 a 10.9 mg/kg de Ga, Y, La, Ce y Nd (tabla 7).

Sin embargo, la técnica de digestión utilizada para la determinación por Espectroscopia Óptica de Emisión Acoplado a un Espectrómetro de Masas (ICP-MS) no logra destruir completamente la matriz en la que se encuentran los elementos, por lo que se realizó el análisis de las muestras en Activation Labs por el método INAA/TD-MS con digestión total de los elementos (tabla 8 y 9).

En la tabla 8 se muestran los resultados del análisis de Activación de Neutrones (INAA/TD-MS) para la muestra de Michoacán (1271-13) que presentó concentraciones más altas de elementos estratégicos y tierras raras. Se encontró que contiene entre 12 y 13 mg/kg de Ga, de las

tierras raras el Ce es el más concentrado con valores entre 29.7 y 32.2 mg/kg. Los otros elementos importantes son La, Y, Nd, y Sc en orden de mayor a menor concentración.

Tabla 7. Resultados de ICP-MS para las 3 muestras en el tamaño de partícula más grande (a). Digestión parcial con HNO₃.

Elemento	Muestras (mg/kg)		
	446-15a	447-15a	1271-13a
Sc	0.4609	0.1805	4.5114
Ga	1.1440	0.2517	10.4871
Ge	0.7987	0.2998	1.6020
Y	0.7666	0.2035	6.3278
In	0.5593	0.1052	0.1206
La	1.8522	1.5575	5.3774
Ce	3.6235	2.3000	10.8947
Pr	0.4827	0.2161	1.1908
Nd	1.8444	0.8721	4.8130
Sm	0.3917	0.1210	1.0015
Eu	0.1743	0.0260	0.4120
Gd	0.3209	0.0982	1.0660
Tb	0.0870	<L.D.	0.1582
Dy	0.2360	0.0479	1.0513
Ho	0.0817	<L.D.	0.2276
Er	0.1234	<L.D.	0.6361
Tm	0.1235	<L.D.	0.0784
Yb	0.0977	<L.D.	0.5543
Lu	0.1052	<L.D.	0.0610
Th	0.4824	<L.D.	0.5388

Tabla 8. Resultados de análisis INAA/TD-MS para la muestra de Michoacán (1271-13) en 3 diferentes tamaños de partícula (a, b y c).

Tamaño de partícula	Muestra	La	Ge	In
		mg/kg		
	LD	0.1		
a: > 100 micras	1271-13a	12.3	< 0.1	0.2
b: entre 100 y 250 micras	1271-13b	12	< 0.1	0.3
c: < 250 micras	1271-13c	13	< 0.1	0.2

Muestra	Y	La	Ce	Nd	Sc	Pr	Sm	Gd	Dy	Tb	Er	Yb	Th
mg/kg													
LD	0.1												
1271-13a	11.8	15.2	31.2	11.1	7.9	3.1	1.9	1.8	1.8	0.3	1.1	1.1	1.4
1271-13b	11.8	15.1	32.2	11.1	7.8	3.1	2	1.8	1.8	0.3	1.1	1.1	1.3
1271-13c	11.9	14.6	29.7	10.8	8.7	3	1.9	1.7	1.8	0.3	1.2	1.2	1.4

Se observó que los elementos estratégicos y tierras raras no se concentran en las partículas de menor tamaño, como en el caso de los elementos Fe, Cu, Zn y Pb, por lo que para su recuperación no se considera necesaria la

separación por tamaños de partículas de los jales previamente a la extracción

Por otra parte, se encontró la presencia de Au en una muestra de Taxco (clave 447-15) en concentraciones entre 0.415 y 2.15 mg/kg (tabla 9), lo cual indica que este jal tiene potencial para la extracción de este metal precioso, el cual si se concentra en el tamaño de partícula menor.

Tabla 9. Resultados de análisis INAA para la muestra de Taxco, Gro. 447-15 en 3 diferentes tamaños de partícula (a, b y c).

Método	INAA	Au
LD	0.002	
Tamaño de partícula	Muestra	mg/kg
a: > 100 micras	447-15a	0.415
b: entre 100 y 250 micras	447-15b	0.608
c: < 250 micras	447-15c	2.15

Conclusiones

Los elementos mayoritarios presentes en las muestras de jales mineros fueron Fe, Zn, Pb y Cu, mientras que los elementos estratégicos y tierras raras se encontraron como elementos minoritarios. La muestra de Michoacán (1271-13) presentó concentraciones relativamente altas de los elementos Ga, Ce, Y, La, Nd y Sc, por lo que a esta muestra se le considera como un jal con potencial para recuperar estos elementos.

Se encontró también la presencia de Au en una muestra de jal de Taxco de Alarcón, Guerrero (447-15) en una concentración máxima de 2.15 mg/kg, la cual se considera alta debido a que es un metal de alta ley (0.93 mg/kg) (Perelló y Cabello, 1989), por lo que este jal también tiene potencial de recuperación de este elemento.

Se demostró que de manera general los metales no estratégicos se concentran más cuando se tiene únicamente la fracción de partículas más pequeñas de la muestra original de jales, mientras que los elementos estratégicos no presentaron esta tendencia, por lo que el método de extracción se aplicaría en la muestra original sin separación previa de tamaños de partícula.

Agradecimientos

Al Proyecto PAPIIT IA105216 por el apoyo otorgado al proyecto.

A la Dra. Ofelia Morton y a la M. en C. Elizabeth Hernández del Instituto de Geofísica UNAM por el apoyo en las determinaciones de ICP-MS.

Referencias

Dodson J.R., Hunt A.J., Parker H.L., Yang Y., Clark J.H. (2012). Elemental sustainability: Towards the total recovery of scarce metals. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 51: 69-78.

Estudio de la Comisión Europea. (2010). Critical raw materials for the EU, European commission, Enterprise and industry, p. 11-85. Recuperado el 20 de abril de 2016 de http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical/index_en.htm.

Gupta B., Mudhar N., Begum I, Z., Singh I. (2007a). Extraction and recovery of Ga (III) from waste material using Cyanex 923. *Hidrometallurgy*, 87: 18-26.

Gupta B., Mudhar Singh I. (2007b). Separations and recovery of indium and gallium using bis(2,4,4-trimethylpentyl) phosphinic acid (Cyanex 272). *Separation and Purification Technology*, 57: 294-303.

Habashi F. (1997). Handbook of extractive metallurgy. Die Deutsche Bibliothek, WILEY-VCH, Vol. 3, p. 1505-1571.

Harbuck D. (1992). Gallium and germanium recovery from domestic sources. Report of Investigations 9419, United States Department of the Interior. Bureau of Mines, p. 2-5.

Mastalerz M. y Drobnik A. (2012). Gallium and germanium in selected Indiana coals. *International Journal of Coal Geology*, 94: 302-313.

Perelló J., Cabello J. (1989). Pórfidos cupríferos ricos en Oro: Una revisión. *Andean Geology*, Vol. 16, No. 1, p. 73-92.

Schlömann M. (2016). Cadena de procesos para la obtención de metales a partir de menas, relaves y material reciclable. Freiderber Biometallurgical Center for Strategic Elements. Recuperado el 23 de abril de 2016 de <http://tu-freiberg.de/forschung/bhmz-2>.

Wood S., Samson I. (2006). The aqueous geochemistry of gallium, germanium, indium and scandium. *Ore Geology Reviews*, 28: 57-102.