APLICACIÓN DE PROCESOS METALÚRGICOS PARA LA EXTRACCIÓN Y RECUPERACIÓN DE METALES A PARTIR DE ESCORIAS DE FUSIÓN

R. Martinez Peñuñuri

Universidad de Sonora

Laboratorio Tecnologico de Metalurgia LTM

Introducción

México cuenta con una larga tradición minera y metalúrgica, con una concentración histórica de operaciones en las regiones centro y norte del país.

Durante gran parte del auge de estas actividades, la ausencia o la aplicación deficiente de normativas ambientales generó una gestión inadecuada de los residuos derivados de los procesos extractivos, comúnmente denominados jales mineros o pasivos ambientales mineros, cuando estos representan un riesgo al ambiente o a la salud.

SGM, 2023; NOM-157-SEMARNAT-2009; Arcos Serrano

Metal	Proceso	Tipo de residuo
Oro	Se amalgama con mercurio y se puede tratar con una solución de cianuro potásico	Posiblemente tiene residuos de mercurio o de cianuro
Plata	Extracción por cianuración y la amalgamación.	Posiblemente tiene residuos de mercurio o de cianuro
Cu	La lixiviación en montón se hace con ácido sulfúrico	Residuos ácidos y elementos asociados como plomo
Zinc	Lixiviación con ácido sulfúrico y flotación.	Residuos ácidos y elementos asociados.
Cadmio	Varios, dependiendo el metal al que este asociado (Pb o Zn)	Cadmio o plomo
Plomo	Por flotación para reducir el óxido plumboso para separar el estaño, níquel, cobalto y arsénico.	El estaño, níquel, cobalto arsénico y el mismo plomo.
Arsénico	El arsénico se encuentra como impureza en casi todas las menas metálicas, por ejemplo en las piritas y las menas sulfuradas de cobre y plomo.	actualmente hay montañas de ganga de este material
Hierro	Por imantación y flotación	Residuos ácidos y elementos asociados como fenoles y cresoles, amoníaco, compuestos de arsénico y sulfuros

Fuente: Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos — IdeGeo / CentroGe; **Flores-Ramírez et al. (2012).** *Exposición infantil al plomo en sitios contaminados.* Salud Pública de México, 54(4), 383–392. Caracterización de residuos mineros para la construcción de subrasante, *Geotecnia SMIG, (258), 1-52. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica.*

Introducción

Jales Mineros. - La escoria es casi siempre el producto de desecho, pues en ella se acumulan la mayoría de las sustancias no deseables del proceso utilizado.

ALGUNAS SUSTANCIAS EN JALES MINEROS:

- Acido sulfúrico, Arsénico, Cadmio, Cianuros de Potasio y Sodio, Niquel, Plomo y Mercurio, principalmente.

PRINCIPALES ESTADOS CON RESIDUOS MINEROS:

- Sonora, Chihuahua, Zacatecas y Durango.

PRINCIPALES ESTADOS CON CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS POR RESIDUOS MINEROS:

- Zacatecas, Querétaro, Hidalgo y San Luis Potosí.

Sitios como Puerto de Concepción (Aguascalientes), Rosario (Sinaloa), Nacozari (Sonora), Cananea (Sonora), Ávalos (Chihuahua), Morales (San Luis Potosí) y Cedral (San Luis Potosí) son ejemplos de la persistencia de estos residuos, los cuales continúan liberando contaminantes a través del arrastre eólico o la filtración hacia cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

Escorias de fusión

Las escorias de fusión representan un subproducto sólido de especial atención.

Contaminantes

Suelen contener concentraciones significativas de metales pesados tóxicos como plomo (Pb), arsénico (As) y cadmio (Cd).

Beneficio

Elementos de valor económico como plata (Ag), zinc (Zn) y oro (Au)

Reprocesamiento de Pasivos Ambientales

Estas mismas escorias representan también una fuente secundaria de metales, con el potencial de ser revalorizadas mediante tecnologías de procesamiento metalúrgico adecuadas

Esquema de tratamiento metalúrgico

Objetivos

Mitigar los impactos ambientales derivados de la disposición de escorias históricas

Recuperar de manera selectiva metales de interés económico (Pb, Zn, Ag, Au)

Sentar las bases para el aprovechamiento sostenible de pasivos industriales

El enfoque metodológico combina técnicas de concentración gravimétrica, lixiviación ácida y extracción por solventes.

Metodología

Caracterización físico-química de las escorias de fusión

La caracterización incluyó estudios por microscopía electrónica de barrido (MEB) para el análisis morfológico y mineralógico

Ensaye a fuego (EF) para la determinación cuantitativa de oro y plata

Espectroscopía de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) para cuantificar los elementos metálicos de interés (Zn, Pb, Cu, Ag, Au) así como contaminantes relevantes.

Metodología

Circuito Metalurgico

Calibración del proceso de molienda, con el fin de alcanzar un tamaño de partícula de P80 74 µm (equivalente a malla 200).

Concentración gravimétrica utilizando un concentrador centrífugo tipo KNELSON

Concentración por flotación utilizando colas del concentrador centrífugo tipo KNELSON

Lixiviación dinámica en botella, (80% < 74 µm) durante un tiempo de agitación de 72 horas bajo condiciones atmosféricas.

Lixiviación intensiva en autoclave, bajo condiciones controladas de presión y temperatura, durante 2 horas

Pruebas de extracción por solventes sobre las soluciones acuosas obtenidas tras la lixiviación con ácido sulfúrico:

- ácido di-(2-etilhexil) fosfórico (DEHPA)
- Cyanex 272

Resultados

Caracterización

Mineralógica Cualitativa y

Cuantitativa

Plomo

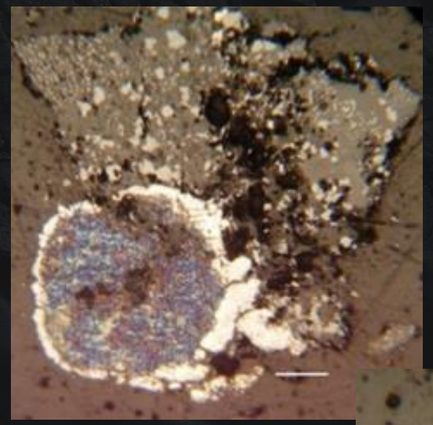
Microesferas metálicas de 40–80 µm de diámetro, con altos contenidos de plomo metálico (>80%), frecuentemente asociadas con otros elementos como As, Sb, Cu y Fe

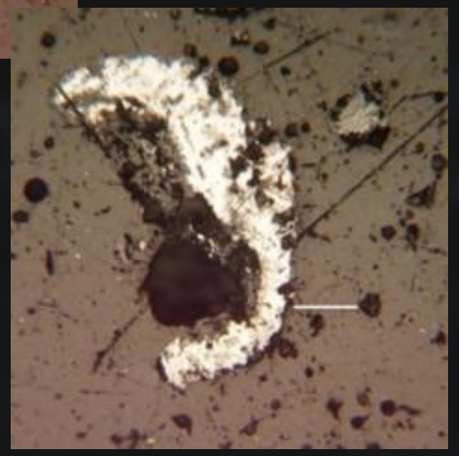
Zinc

Zn se encuentra principalmente en forma de sulfuros, particularmente esfalerita rica en hierro (24–44% Zn), así como en sulfuros de cobre y hierro (4–10% Zn), óxidos de hierro tipo magnetita (3–11% Zn)

Multi elementos

El análisis multielemental por ICP-OES mostró concentraciones apreciables de Zn (8.49%), Pb (1.29%), y Ag (35.97 ppm). Se identificaron también niveles relevantes de As, Cd, Sb y Mo, elementos de interés tanto por su toxicidad ambiental como por su valor potencial.





Resultados

Tamaño de Partícula		P80 200# (74 micras)		
Producto Metalúrgico		Conc. de Batea	Medios	Relaves
Pb	Ensaye (%)	13.37	1.61	1.16
	Distribución (%)	14.18	6.18	79.64
Zn	Ensaye (%)	7.16	7.50	8.10
	Distribución (%)	1.28	4.84	93.88
Au	Ensaye (g/t)	1.66	0.15	<LD
Ag	Ensaye (g/t)	826	90	20

Reducción de tamaño de partícula y Concentración Gravimétrica Knelson

El Pb en partículas metálicas en forma de microesferas de un tamaño entre 40 – 80 µm, ya sea de composición superior a 80 % de Pb, o bien en aleaciones metálicas que involucran también As, Sb, Cu y Fe, ha logrado un efecto positivo.

Resultados

Weight		Assays					Distribution (%)				
(g)	(%)	Ag (g/t)	Pb (%)	Zn (%)	Ca (%)	Fe (%)	Ag (%)	Pb (%)	Zn (%)	Ca (%)	Fe (%)
17.40	1.74	561.31	13.55	13.21	7.57	20.53	25.15	18.92	2.50	0.95	1.58
23.80	2.38	178.43	3.46	12.46	12.25	21.66	10.94	6.61	3.22	2.10	2.28
14.20	1.42	108.09	2.59	11.73	11.84	20.92	3.95	2.95	1.81	1.21	1.31
19.70	1.97	269.48	2.78	14.02	9.08	9.08	13.67	4.39	3.00	1.29	0.79
90.90	9.09	56.68	1.53	10.52	11.95	22.33	13.27	11.17	10.39	7.83	8.97
54.30	5.43	32.75	1.16	13.53	13.44	25.00	4.58	5.07	7.98	5.26	6.00
779.70	77.97	14.17	0.81	8.39	14.47	22.94	28.45	50.89	71.09	81.35	79.06
1000.00	100.00	38.83	1.25	9.20	13.87	22.62	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
		15.01	1.16	8.10	8.10	24.11					
		258.76	107.48	113.52	171.19	93.83					

Sumando las fracciones, concentrado rougher, medios y concentrado secundario de Pb se logró una recuperación de 28.48% de recuperación, con leyes de 13.55%, 3.46% y 2.59% de plomo.

En esta misma prueba, Flot.4 P80 200#, se obtuvo una recuperación de 40.04% de Ag (plata) al sumar las fracciones concentrado rougher, medios y concentrado secundario de Pb, con una leyes de 561.31, 178.43 y 108.09 g/t de plata, en sus respectivas fracciones.

Haciendo un análisis teórico se determinó que los elementos se encuentran encapsulados en una película vidriada la cual evita el contacto con los reactivos de flotación.

Existe una íntima relación que se tiene en las partículas metálicas formadas (Pb, Zn , Fe) después de la escorificación.

Resultados

Lixiviación de escorias

Identificación del Compósito	Cabeza Ensayada (%)	Cabeza calculada (%)	Extracción (%)
	Zn	Zn	Zn
PB1 200# RK	7.15	8.04	80.07
LI10 200# RK	11.340	11.410	92.75

% de extracción

Las pruebas realizadas de lixiviación con H2SO4 en Autoclave y lixiviación H2SO4 dinámica en botella, logro extracción de Zn de 80.07% en condiciones ambientas, y 92.75% en condiciones óptimas de lixiviación intensiva

Parámetros

Lixiviación Dinámica
Dosificación de 55 g/L de ácido sulfúrico, 15% de sólidos y 72 horas. 60 RPM

Lixiviación Intensiva
Dosificación de 55 g/L de ácido sulfúrico, 15% de sólidos y 2 horas. 600 RPM. 100 PSI y 90 ºC.

Consumo

El consumo de ácido sulfúrico es considerablemente alto, debido a los componentes de la escoria y su reactividad, con la generación de sulfato de calcio.

Extracción por Solventes

Resultados

Con Cyanex 272, destacan los siguientes puntos:

- Existe una mayor selectividad de este reactivo sobre elementos contaminantes como Ca y Fe.
- Las condiciones de relación orgánico-acuoso (O:A) de 0.33 arrojaron los mejores resultados, con 94.24% de recuperación de Zn con Cyanex 272.

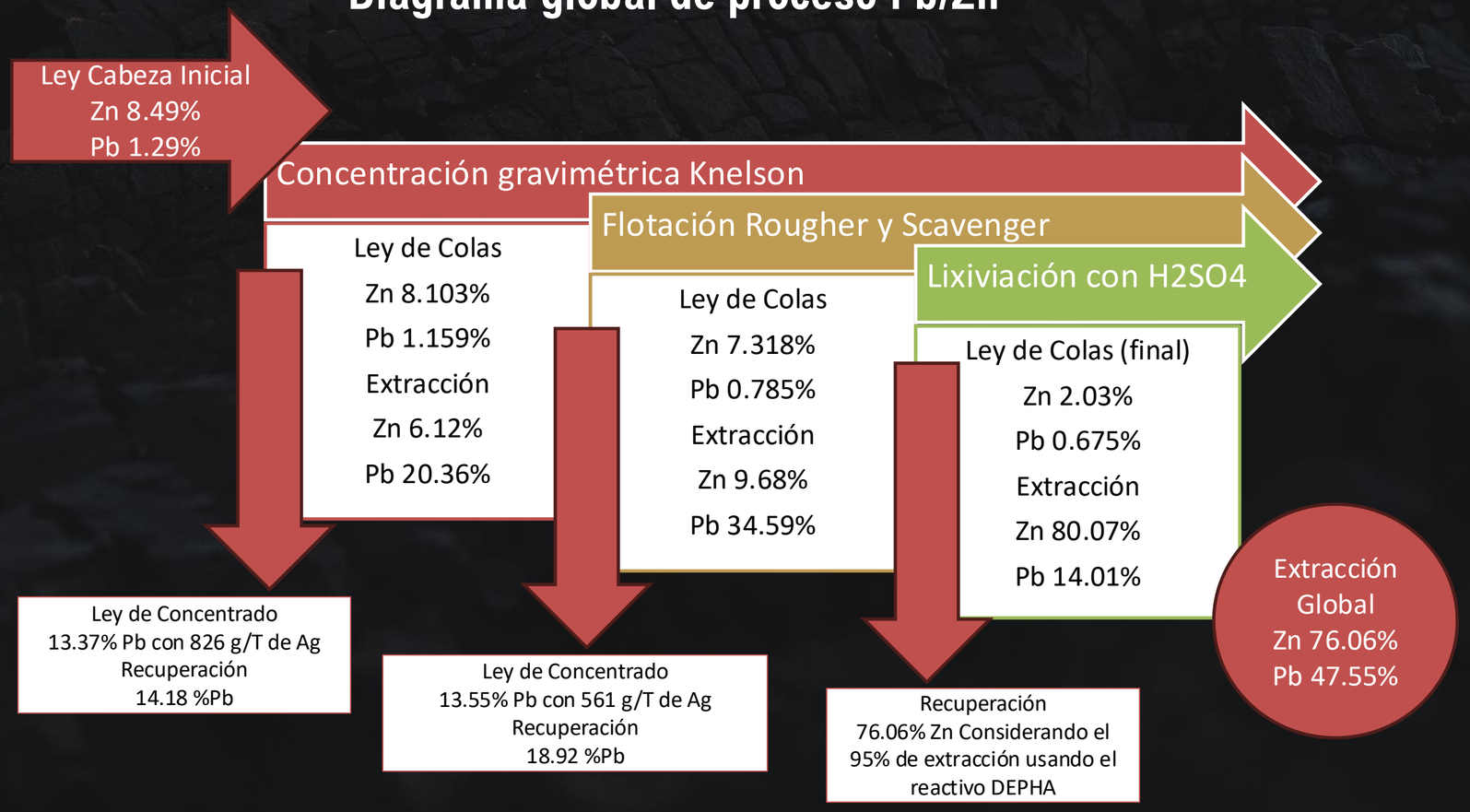
Con DEPHA, destacan los siguientes puntos:

- Las condiciones de relación orgánico-acuoso (O:A) de 2.0 arrojaron los mejores resultados, con 95.30% de recuperación de Zn con DEPHA.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en esta primera fase de investigación demuestran la **viabilidad técnica** de aplicar un esquema **metalúrgico secuencial** —basado en concentración gravimétrica, lixiviación ácida y extracción por solventes— para el tratamiento de escorias de fusión con contenido metálico residual.

Diagrama global de proceso Pb/Zn



Conclusiones

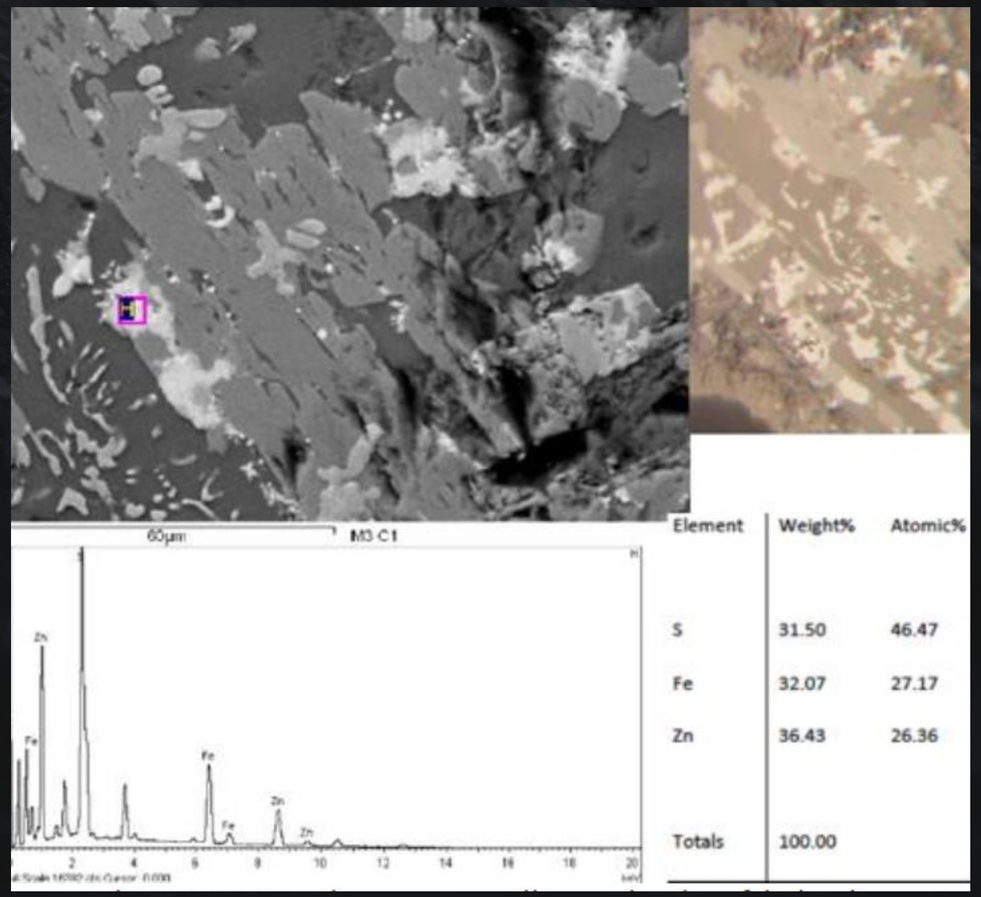
En conjunto, este trabajo demuestra que el tratamiento de escorias históricas no solo es viable desde el punto de vista técnico, sino que también representa una oportunidad para la **remediación ambiental y la recuperación de metales valiosos desde pasivos minero-metalúrgicos**.

Concentración gravimétrica mediante un concentrador centrífugo tipo Knelson permitió la recuperación efectiva de fracciones libres de plomo (14.18%), con leyes metalúrgicas favorables (13.372% Pb y 826 g/t Ag).

El comportamiento en la flotación Rougher y Scavenger
es insatisfactoria, debido a esto:
1.- El plomo (Pb) se determinó en forma metálica de microesferas de 80 micrones.
2.- Se determinó, que en la matriz cristalizada existen concentraciones entre el 1 al 10 % de Zinc lo que esta película vidriada no permite la completa acción o contacto de los reactivos de flotación con este tipo de escorias recubiertas con sílice (SiO2).

La lixiviación dinámica en condiciones atmosféricas (72 horas, 55 g/L H_2SO_4, 15% sólidos) demostró ser efectiva para la extracción de zinc, con eficiencias del 80.07%, mientras que bajo condiciones intensificadas (autoclave, 2 h) se alcanzó una extracción de hasta 92.75%.

La extracción por solventes (SX) sobre soluciones lixiviadas resultó altamente eficiente. Se obtuvieron recuperaciones de 94.24% con Cyanex 272 y 95.30% con DEHPA



Element	Weight%	Atomic%
S	31.50	46.47
Fe	32.07	27.17
Zn	36.43	26.36
Totals	100.00	

XXXVI CONVENCIÓN INTERNACIONAL DE MINERÍA ACAPULCO 2025

LA MINERÍA UNIDA POR MÉXICO

Contactos

HTTPS://WWW.LINKEDIN.COM/IN/RODRIGOMARTINEZP/

RMARTINEZ@METALURGICOS.COM.MX

HERMOSILLO, SONORA

AGRADECIMIENTOS

Gracias a la Universidad de Sonora, y a Laboratorio Tecnológico de Metalurgia LTM del Corporativo Sonora Naturals