

# Lixiviación en tanques abiertos de los arseniuros de una fundición de plomo en la Sierra Central, Perú

## Open tank leaching of arsenides from a lead smelter in the Central Highlands, Peru

Luis Américo Rivera Del Valle<sup>1</sup>, Vidal Sixto Aramburú Rojas<sup>2</sup>

Recibido: 27/10/2021 – Aprobado: 16/05/2022 – Publicado: 30/06/2022

### RESUMEN

El contenido de arsénico de las emisiones gaseosas de una fundición representa un grave riesgo para la salud humana, ya que éstas se reportan en los suelos y aguas circundantes. Dentro de las operaciones de una fundición, los subproductos con alto contenido de arsénico recirculan indefinidamente en lugar de ser drenados. Con la finalidad de proporcionar una alternativa ambiental, el presente trabajo de investigación evalúa el proceso de Lixiviación Ácida Oxidativa que emplea la mezcla  $H_2SO_4 - H_2O_2$  para disolver los arseniuros, tratamiento que debe completarse con la remoción ambiental por precipitación del arsénico como Escorodita; proceso conocido y de aceptación mundial. Los parámetros óptimos obtenidos son: 240 kg/t de  $H_2O_2$ , concentración de 120 g/L de  $H_2SO_4$ , relación L/S de 9/1 y como aportante de fierro: 170 kg/t de relave de cobre, con los cuales se logran disoluciones de 56 % de As y 90 % de Cu; elemento cuya recuperación paga el proceso.

**Palabras claves:** lixiviación ácida oxidativa; arsénico; arseniuros; precipitación; escorodita.

### ABSTRACT

The arsenic content of a smelter's gaseous emissions represents a serious risk to human health, as they are reported in soils and waters. Within a smelter's operations, by-products with high arsenic content recirculate indefinitely instead of being drained. In order to provide an environmental alternative, the present research work evaluates the Acid Oxidative Leaching process that uses the  $H_2SO_4 - H_2O_2$  mixture to dissolve the arsenides, which must be completed with environmental removal by precipitation as Scorodite; a process known and accepted worldwide. The optimal parameters obtained are: 240 kg/t of  $H_2O_2$ , concentration of 120 g/L of  $H_2SO_4$ , L/S ratio of 9/1 and as iron contributor: 170 kg/t of copper tailings, with which solutions of 56% As and 90% Cu; item whose recovery pays for the process.

**Keywords:** geometallurgy; models; deposits; metallurgy.

1 Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú.

Autor para correspondencia: [lriverad@unmsm.edu.pe](mailto:lriverad@unmsm.edu.pe) - ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0236-4564>

2 Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú.

E-mail: [varamburur@unmsm.edu.pe](mailto:varamburur@unmsm.edu.pe) - ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7411-3866>

## I. INTRODUCCIÓN

Ya hace más de un siglo que se viene empleando el proceso pirometalúrgico para producir cobre a partir de concentrados de sulfuro que contengan calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) como principal especie mineralógica, acompañado de sulfuros como la Bornita (Mosweu, 2014) que tienen, a su vez, impurezas como el antimonio, bismuto, etc. Cuando el arsénico es mayor a 2,0%, la fundición convencional presenta numerosos problemas relacionados no sólo a contaminación ambiental, sino también al deterioro de la calidad del cátodo de cobre que se produce, por lo que se ha investigado bastante la recuperación de cobre de tales concentrados mediante métodos no convencionales (Aracena et al., 2020) entre ellas, por ejemplo, la disolución del arsénico de la enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ), que también es una especie mineralógica de cobre en medio  $\text{H}_2\text{SO}_4$ - $\text{NaCl}$ - $\text{O}_2$ , que disolvió 6% del arsénico en 7 horas de lixiviación a 100 °C con 0,25 M de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , con un flujo de oxígeno de 0,3 l/min (Padilla et al., 2005) Aunque sigue siendo lenta la disolución de la calcopirita (Padilla et al., 2010), (Bogdanović et al., 2020), la lixiviación selectiva del arsénico del concentrado de enargita utilizando lixiviación alcalina en presencia de piritita es un tratamiento prometedor para extraer el arsénico de la enargita, en el cual la concentración de hidróxido de sodio tiene el mayor efecto sobre la disolución de arsénico, ya que se alcanzó eliminar más del 99% del arsénico. La caracterización del residuo mostró que la enargita se convirtió en sulfuros de cobre no arsenicales tipo  $\text{Cu}_x\text{S}_y$  (T. Li et al., 2018); sin embargo, resulta poco conveniente pasar del tratamiento básico al ácido, el cual es usualmente empleado para recuperar los demás elementos valiosos del mineral.

En otro estudio sobre la revisión de los procesos alternativos como: Lixiviación con sulfuro alcalino (ASL), lixiviación con hipoclorito, lixiviación con ácido sulfúrico y lixiviación por oxidación a presión combinada (POX), el proceso alcalino disuelve As, Sb y Hg de muchos minerales, pero no lixiviana arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ); otro componente importante de los concentrados de cobre (Lane et al., 2016). Resultados muy similares se obtuvieron durante la lixiviación de la calcopirita (Bogdanović et al., 2020).

En la actualidad, las tecnologías que disuelven arsénico (además de cobre) y que emplean oxidación a presión de concentrados de enargita con oro y plata son Activox, Nenatech, Dynatec, AAC/UBC, Placer Dome Process, Biocop, Bactech/Mintek, Geocoat, otros abarcan estudios desde nivel de laboratorio hasta plantas comerciales, pero también existen plantas para especies de cobre más lixiviables como calcocitas, como en el caso de Las Cruces en España y Mt. Gordon Process en Australia (Conner & Anderson, 2015).

Un estudio que investigó la calcinación por sulfatación entre 300°C y 800°C para conseguir altos niveles de extracción de cobre y fijación de arsénico determinó el resultado en un proceso altamente exotérmico, lo cual podría solucionarse con operaciones de tostación parcial, que son ineficientes, por lo que, la opción del proceso de SX/EW podría ser una mejor alternativa (Tadashi Chambers, 2012).

Aunque las reservas de mineral oxidado ya casi han desaparecido, hay un estudio de la lixiviación de un mineral de cobre oxidado de 3,10% de Cu, que alcanzó una tasa de lixiviación de cobre del 92 % por lixiviación sulfúrica (Zhu et al., 2016).

La mejor respuesta a la lixiviación es la aplicada a un producto del proceso pirometalúrgico: metales, aleaciones, arseniuros, matas, escorias, polvos y cenizas, en comparación a los minerales sulfurados naturales que contienen arsénico (Neustroev et al., 2015). Por ejemplo, la lixiviación oxidativa en autoclave de una aleación de Au-Sb, con menos de 25 % de Cu y Ni, difíciles de disolver a presión atmosférica y en medio sulfúrico reportó 99 % de disolución de Cu y Ni, pero se tiene que aplicar una segunda lixiviación con ácido clorhídrico para eliminar más de 92% Sb, lográndose enriquecer el residuo en Au en 66% (Dou, 2016). Otro ejemplo de lixiviación oxidativa en autoclave de las cenizas de fundición de plomo alcanza extracciones de As, Cd, In, Zn y Sb del 98,19%, 98,98%, 91,72%, 95,32% y 24,23% respectivamente (W. Li et al., 2021).

El objetivo de la presente investigación es determinar los parámetros óptimos de: consumo de peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), concentración de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y relación L/S en la lixiviación ácida oxidativa (LAO) de arseniuros, para evitar las emisiones arsenicales de una fundición producto de su retratamiento pirometalúrgico. Teniendo en cuenta el marco teórico actual, el proceso que plantea esta investigación utiliza la mezcla de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$ , que da lugar a la formación del ácido de Caro ( $\text{H}_2\text{SO}_5$ ) de alto poder oxidante. En resultados de disolución metálica, compete con la lixiviación en autoclave, de altos costos de inversión, resultando ser una alternativa de baja inversión.

En la separación S/L siguiente se obtiene el residuo Pb/Ag, que es devuelto a la Fundición de Plomo para su eficiente recuperación, mientras que la solución es utilizada para la producción de cobre catódico o sulfato de cobre previa precipitación del arsénico y fierro como escorodita (Wang et al., 2019).

## II. MÉTODOS

### 2.1 Materiales

Para el presente estudio, se preparó 40 kg de arseniuro, el cual se clasificó mediante tamizado, en fracciones de tamaño de - # 100 mallas (145  $\mu\text{m}$ ), para su caracterización y análisis químico.

La fracción de tamaño de - # 100 mallas fue utilizada para elaborar el diseño de proceso en base a los análisis químicos de la muestra de arseniuro que, reporta niveles de 41 % de Cobre y 15 % de As (Tabla 1) y de la composición mineralógica que se muestra en la Tabla 2, donde se aprecia que la forma en que se encuentra el arsénico es formando intermetálicos de Cu-As (arseniuro de cobre, sintético).

De la Tabla 2, se aprecia que el mayor constituyente mineralógico de los arseniuros es el intermetálico As-Cu (98.5 % As), que contiene el 60 % del cobre "refractario",

**Tabla 1.** Análisis químico de los arseniuros, % (\*g/t)

Cu	Pb	Bi	Sb	Fe	S	As	*Ag	*Au
41	19	0.59	4.45	2.95	2.62	15	5171	2.6

\* composición en gramos por tonelada métrica

**Tabla 2.** Distribución mineralógica de los arseniuros

Especie Mineralógica	% Mineralógico	% Cu	% As
Intermetálicos As-Cu	42	60	98.5
Intermetálicos Cu-Pb	36	26	1.5
Pb Metálico	14		
Antimoniuro de Cobre	3	6	
Cu Metálico	3	8	
Insolubles	2		

siendo la diferencia de 40 % de fácil recuperación por lixiviación sulfúrica ácida simple (Neustroev et al., 2015b).

En la Figura 1, se muestra una foto a 140 aumentos de la gran variedad tonalidades de arseniuros encontrados en el análisis por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) de los compuestos de transición que van desde grises claros (intermetálicos Cu-Pb con alto contenido de Cu), luego intermetálicos As-Cu, hasta brillantes (de alto contenido de Pb metálico), todos con textura metálica.

En la Figura 2, se muestra una foto a 1880 aumentos de un fragmento de 150  $\mu\text{m}$  que corresponde a un intermetálico Cu-Pb con alto S, dentro del cual se aprecia una nube brillante de Pb metálico.

La metodología empleada para desarrollar la presente investigación es EXPERIMENTAL APLICADA. La Figura 3 muestra la secuencia del proceso, poniendo de manifiesto las dos etapas por la cual se logra disolver y precipitar el arsénico.

## 2.2 Laboratorios de experimentación

Las pruebas de tostación y lixiviación se realizaron en los laboratorios de Investigación y Desarrollo de la empresa Doe Run Perú - La Oroya. El equipo empleado para las pruebas fueron 1 horno Hoskins, 1 horno de mufla eléctrica. Para las pruebas de lixiviación se usaron: 1 agitador de hélice, 1 potenciómetro, 1 fluorómetro, 1 cronómetro, entre otros. En la Figura 4 se muestra un esquema representativo de las pruebas de lixiviación.

## 2.3 Método de lixiviación ácida oxidativa (LAO)

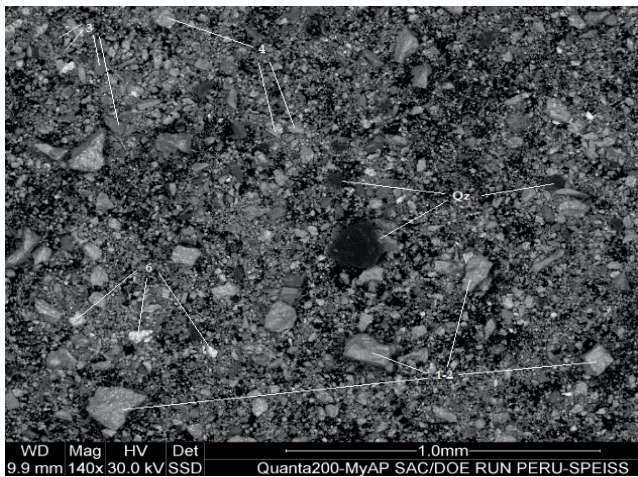
Es un proceso en medio de ácido sulfúrico, que emplea el oxidante fuerte: peróxido de Hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), que previamente reacciona con el ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), generando una alta energía por la formación del ácido de Caro ( $\text{H}_2\text{SO}_5$ ) y un alto potencial de oxidación, traducida en la disolución del arsénico contenido en las especies intermetálicas de As, aprovechando el sinergismo del  $\text{H}_2\text{O}_2$  y el hierro (III) como oxidantes (Nicol, 2020).

Es importante mencionar que la mayoría de las especies intermetálicas pueden ser lixiviadas con sólo con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y oxígeno (Neustroev et al., 2015), dejando las más refractarias para el proceso de LAO, que consume de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , reactivo limitante del proceso por su alto costo. El consumo de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  para la LAO oscila entre 200-300 kg/t de arseniuro, remueve cerca al 70 % de As a partir del arseniuro molido (-145  $\mu\text{m}$ ). Hay una diferencia significativa (de casi el 12 % de remoción de As) entre la lixiviación de material molido y la obtenida sin moler.

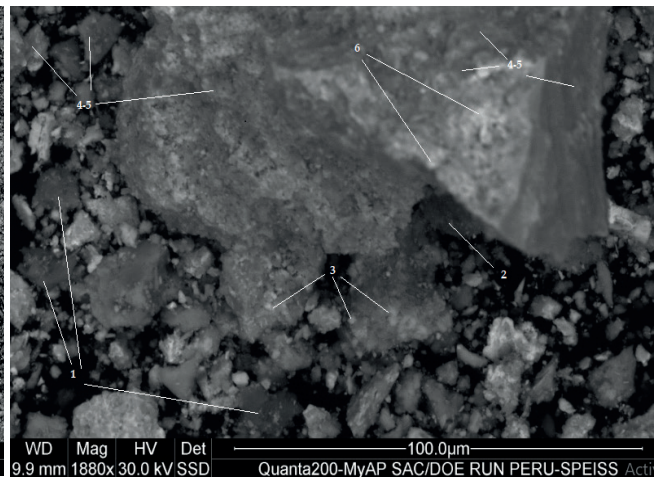
Otro aspecto importante del proceso es la separación sólido líquido (S/L) posterior, la cual está condicionada a la concentración de ácido sulfúrico en la solución final, ya que el As en solución acuosa existe en forma de oxianiones (estados de oxidación trivalentes o pentavalentes), dependiendo del potencial de oxidación-reducción y del pH del medio (Partha, 2012). Lo más recomendable será filtrar manteniendo el arsénico y hierro en solución, lo que se consigue a altas concentraciones de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . El residuo Pb/Ag obtenida así es más libre de arsénico y retorna al circuito pirometalúrgico de plomo para su eficiente recuperación. El As de la solución se inmoviliza por precipitación del arseniato de hierro  $\text{FeAsO}_4$  (escorodita); compuesto estable que, para extremar las medidas de seguridad, debe ser encapsulado en un depósito ambiental (Massardo & Rous, 2019) el cual adicionalmente puede ser estabilizado (Mondal et al., 2020) y puede convertirse en un recurso estratégico para la fabricación de superconductores en base a Fe-As, cuyo conocimiento está en continuo crecimiento (Canfield & Bud'ko, 2010), (Zhao et al., 2020), (Llovo et al., 2021), (Sun et al., 2020), (Rasaki et al., 2020), (Seitz et al., 2017).

A partir de la solución ya purificada, se aplica la cristalización del sulfato de cobre o producción de cátodos de cobre en instalaciones ya existentes de SX/EW (Tadashi Chambers, 2012).

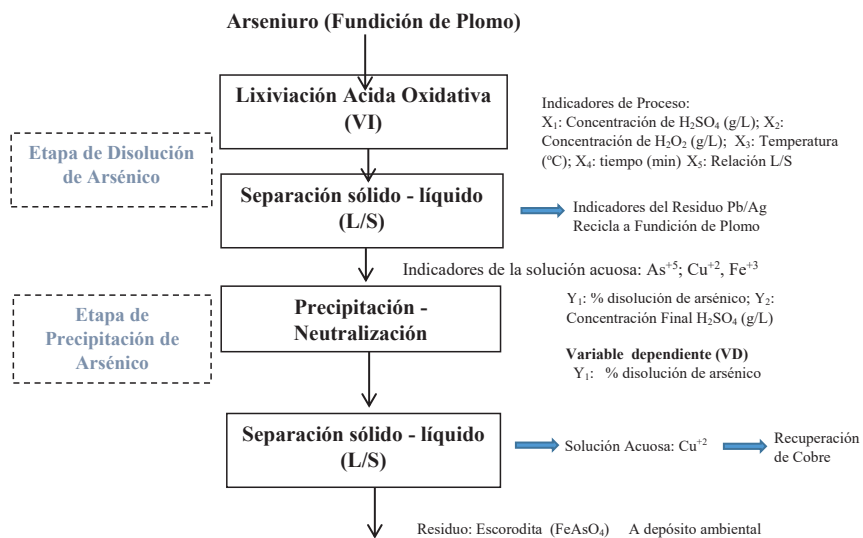
Las mayores remociones de As tienen que ver con el contenido de Fe de los materiales aportantes de este elemento, ya que su deficiencia dará lugar a la formación de arseniato de cobre ( $\text{CuAsO}_4$ ); compuesto que se quedará en



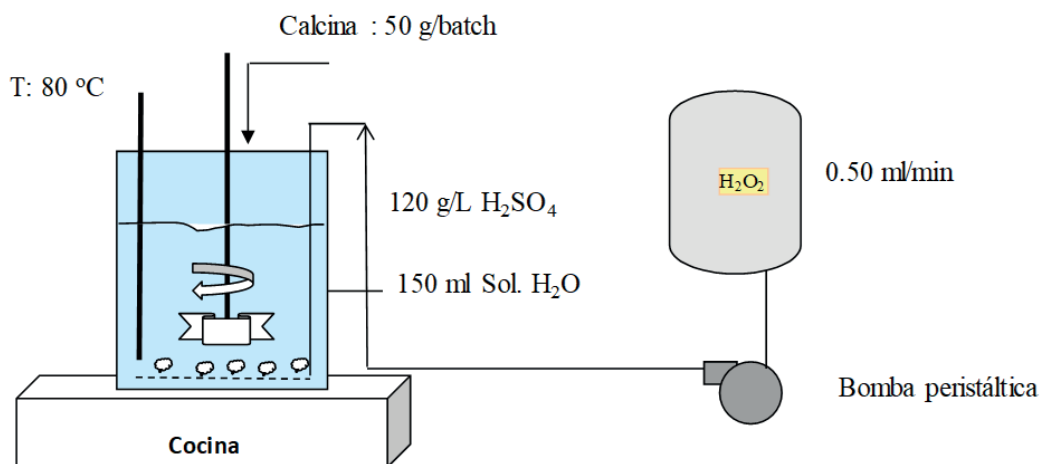
**Figura 1.** Foto A 140 aumentos: composición total de los arseniuros Intermetálico 1 : alto en Cu  
Intermetálico 2 : alto en Fe  
Intermetálico 3 : alto en Sb



**Figura 2.** Foto a 1880 aumentos: Se muestra un fragmento de 150 µm. Intermetálico 4 : alto en S  
Intermetálico 5 : alto en As  
Intermetálicos : alto en Pb (los más brillantes).



**Figura 3.** Esquema para la lixiviación ácida oxidativa de los arseniuros de una fundición de plomo



**Figura 4.** Esquema representativo de las pruebas de lixiviación de arseniuros a nivel de Laboratorio

el residuo de lixiviación, disminuyendo así la extracción de cobre. Se pueden utilizar diferentes materiales aportantes de hierro (MAH) como pirita, relaves de cobre, concentrados de plomo, etc.

### III. RESULTADOS

#### 3.1 Pruebas preliminares

La evaluación de los distintos procesos de tostación del arseniuro a nivel de laboratorio se llevó a cabo empleando horno Hoskins (empleo entre 100 y 200 g de muestra), priorizando la formación de una calcina manejable (evitando la formación de grumos o sinterizaciones locales). Pasada esta prueba, se continúa a nivel de mufla eléctrica para la obtención de mayor peso (1-2 kg), necesario para las pruebas de lixiviación.

Las pruebas de lixiviación fueron realizadas empleando ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) y peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), para solubilizar la mayor cantidad de arsénico, el cual está principalmente asociado al cobre. El residuo de Pb/Ag recircula al circuito pirometalúrgico de plomo para su eficiente tratamiento.

##### 3.1.1 Pruebas de Tostación

Previo a las pruebas de lixiviación se efectuó un primer grupo de pruebas de tostación que podrían dar altas tasas de extracción de cobre y arsénico (Tadashi Chambers, 2012), (Sun et al., 2020) tal como ocurre con los sulfuros. Se evaluaron los tipos de tostación oxidante, reductora, sulfatante, clorurante y con cal hidratada. Las calcinas obtenidas mostraron una fuerte aglomeración, propia de los materiales con alto arsénico, la cual imposibilita su tratamiento posterior en los hornos Wedge; los cuales requieren de una calcina en polvo. Las condiciones experimentales, así como los resultados de remoción de As, se muestran en la Tabla 3, donde se aprecia que las más altas remociones de arsénico (93%) se dan cuando se ingresa al proceso la mezcla de arseniuros, pirita y polvos recirculantes. Sin embargo, éstas se deben descartar, ya que darán calcinas con contenidos altos de As, que entorpecerán el proceso de purificación del cobre luego de la lixiviación posterior. La tostación de la mezcla de arseniuro con pirita da buenos resultados de remoción de As, igualmente la

tostación con  $CaCl_2$ . Sin embargo, también producen una calcina aglomerada de difícil manejo práctico, ya que debe ser molida, adicionándose así una etapa más de proceso.

De los deficientes resultados obtenidos en las pruebas de tostación, se juzgó conveniente realizar la lixiviación directa del arseniuro, que responde mejor al proceso de lixiviación, probablemente, porque se trata de un producto intermetálico obtenido en un horno (Neustroev et al., 2015).

##### 3.1.2 Pruebas de Lixiviación

Se efectuó un primer grupo de pruebas que servirá de línea de base, inicialmente sin oxidante, para lo cual se realizó la lixiviación sulfúrica en caliente, empleando 50 g de arseniuro por prueba, una temperatura de proceso de 80°C, 120 minutos de agitación empleando una relación L/S = 3/1, 130 g/l de concentración inicial de ácido sulfúrico durante 2 horas y luego un grupo de pruebas empleando el oxidante  $H_2O_2$ . Las condiciones experimentales, así como los resultados obtenidos, se detallan en la Tabla 4.

#### 3.2 Pruebas en detalle

##### 3.2.1 Efecto de la dosificación de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ )

Las evaluaciones preliminares de laboratorio identificaron al  $H_2O_2$  como el reactivo limitante del proceso, ya que excesos, podrían dar mayores tasas de disolución de As, para ésta evaluación se emplearon arseniuro molido y sin moler. Las condiciones experimentales fueron: 200 g de arseniuro disuelto en 600 ml de agua, con 120 g/l de  $H_2SO_4$ , Relación L/S de 3/1, a 80 °C, durante 120 minutos. En las Figuras 5 y 6 se muestra el efecto de la dosificación de  $H_2O_2$  en el arseniuro sin moler, así como en el molido a -100#mallas, siendo la molienda importante para liberar los arseniuros a pesar de ser dificultosa porque, conforme se muele, el producto molido se lamina; dada su composición basada en intermetálicos, lo más acertado fue emplear el material moderadamente molido. En la Figura 7 se puede apreciar que con el material sin moler se puede obtener niveles más altos de disolución de As, pero con consumos de  $H_2O_2$  prohibitivos (mayores a 1000 kg/t), ajustándose su viabilidad a consumos menores de 500 kg/t de  $H_2O_2$ . Esto puede ser logrado con una molienda “moderada” del arseniuro.

Tabla 3. Pruebas de tostación del arseniuro

Prueba No	Condiciones de tostación (para 100 g de arseniuro), 500 °C								% de remoción As
	pirita	cal	carbón	agua	aire L/hN	NaCl	$H_2SO_4$	otros %	
1	100	10	10		230				64
2		10	10		230				7
3	100				-			As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	93
4	100				-			LAP	83
5	100	1.3	1.3		-				82
6	100	10	10	10	230	4	4		66
7		10	10	10	230	10	10		20
8		10	10	10	230				12



### 3.2.5 Efecto de materiales aportantes de hierro

En las evaluaciones anteriores de LAO del arseniuro se obtuvieron bajas disoluciones de As por falta de Fe en el sistema; debido a la precipitación de parte del Cu disuelto en la lixiviación como arseniato de cobre ( $\text{CuAsO}_4$ ), por lo que, en estas pruebas finales, se evaluó el empleo de soda mata, pirita, relaves de cobre (de alto contenido de pirrotina) y concentrado de plomo (principalmente galena) como aportantes de Fe. Las condiciones operativas empleadas fueron: 170 g de Arseniuro, 30 g de material aportante de

Hierro (MAH); los dos molidos a -100# mallas, se empleó adicionalmente de oxígeno ( $\text{O}_2$ ). En la Figura 10 se aprecia el efecto del uso de pirita; pero con altos consumos de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , (1640 kg/t), resultando más interesante el empleo 175 kg/t de Relave de cobre que baja el consumo de  $\text{H}_2\text{O}_2$  a 240 kg/t

De la Tabla 5 se aprecia que el Fe de los materiales aportantes, como mata soda, pirita, relave de cobre y concentrado de plomo, da lugar a altas disoluciones de As y Cu, siendo la mejor alternativa la mezcla arseniuro/relave de Cobre 170/30 que logra 56 % de disolución de As y que

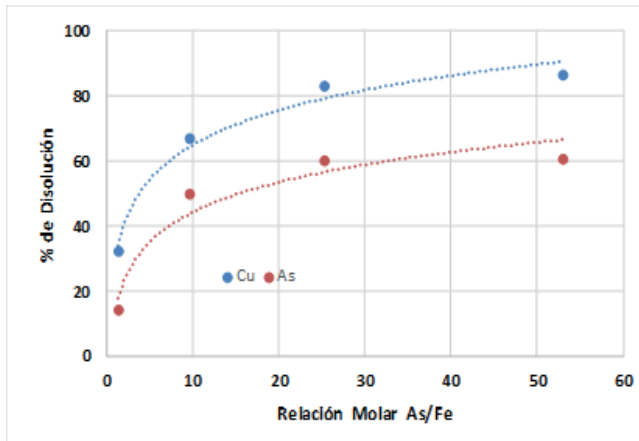


Figura 7. Efecto de la relación molar As/Fe en la filtrabilidad de la pulpa de LAO

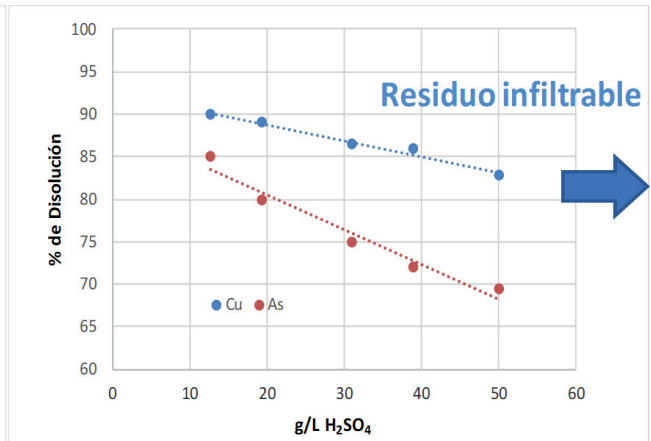


Figura 8. Efecto de la concentración final de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en la filtrabilidad de la pulpa de LAO

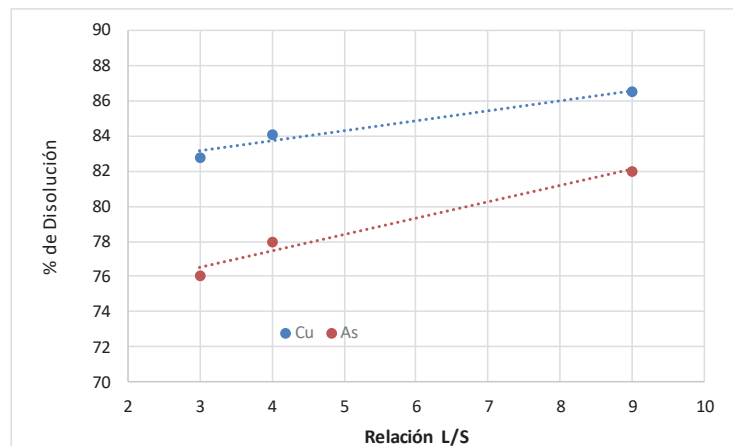


Figura 9. Efecto de la relación L/S en la disolución de As y Cu

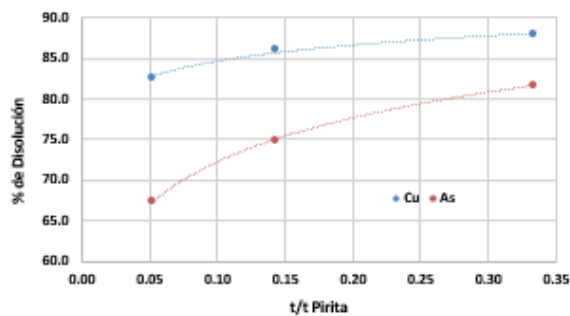


Figura 10. Efecto del consumo de Pirita como aportante de Fe en la LAO de los arseniuros

**Tabla 5.** Condiciones y Resultados de la LAO del Arseniuro empleando materiales Aportantes de Hierro

Parámetros	Soda Mata	Pirita	Relave de Cobre	Concentrado de Plomo
Arseniuro (g)	50	175	170	175
Fuente de Fe (g)	150	25	30	25
Flujo de O <sub>2</sub> (min)	-	-	240	120
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (kg/t)	1500	1620	240	540
% Disolución As	65	62	56	68
% Disolución Cu	86	83	90	88

además logra la mayor disolución de Cu (90%); puesto que también recupera el cobre contenido en el relave, además, ofrece las ventajas de su bajo costo de obtención, ya que sólo se considera su traslado desde la relavera, se evita su molienda; puesto que ya está molido y, sobre todo su bajo consumo de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (240 kg/t).

Cada aportante de hierro debe considerarse como una alternativa de tratamiento potencial dado que ofrece ventajas propias de su contenido metálico, siendo muy interesante evaluar más a detalle, sobre todo el empleo de concentrados de plomo; puesto que, en éste caso, se debe valorizar este otro elemento; que normalmente está asociado a los metales preciosos, su tratamiento hidrometalúrgico debe ser motivo de más investigación, para profundizar en los resultados.

Cabe recalcar que la dosificación de oxígeno por 240 minutos (previo a la adición de peróxido) ayudó a bajar el consumo de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 240 kg/t de arseniuro.

#### IV. DISCUSION

Resulta conveniente realizar la lixiviación directa del arseniuro, que es un producto intermetálico sintético (Neustroev et al., 2015) la tostación con CaCl<sub>2</sub> aunque mejora ligeramente la disolución de As en la lixiviación, produce una calcina aglomerada que debe ser molida, adicionándose una etapa más al proceso.

- La molienda de los arseniuros, por ser dificultosa, debe ser “moderada” (-100#mallas) a fin lograr una eficiente liberación el AsCu de los arseniuros, a partir de ello, recién se optimizó el consumo de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 240 kg/t.
- Con el fin de obtener altas eficiencias de disolución de As y buena filtrabilidad, la relación As/Fe en la solución final debe mayor que 26, ya por debajo de 10 la eficiencia de disolución del As cae fuertemente.
- Debido a que una acidez final elevada (mayor de 50 g/L) complica el procesamiento posterior en un sistema Fe-As; ya que se obtienen residuos de difícil filtración, el proceso de lixiviación dio mejores resultados empleando soluciones menos ácidas al inicio del proceso, de este modo, la

acidez final estuvo siempre por debajo de 20 g/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

- Las pruebas con el uso de materiales aportantes de Fe logró mejorar aún más la disolución de As (95%), con 180 kg/t de relave de Cobre (con 30 % de Fe), gracias a las interacciones galvánicas generadas por los de iones Fe<sup>+3</sup> y Cu<sup>+2</sup>.

#### V. CONCLUSIONES

- **El consumo óptimo del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> obtenido en el proceso de lixiviación ácida oxidativa fue de 240 kg/t arseniuro, que resulta ser el reactivo limitante del proceso.**
- El proceso de lixiviación produce residuos de fácil separación S/L a concentraciones finales menores a 20 g/L de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, lo que se logra cuando se trabaja con una relación L/S mayor a 9.
- De los materiales aportantes de hierro evaluados, la mejor alternativa fue la mezcla de arseniuro/relave de cobre 170/30, ya que logra las mayores disoluciones de Cu (93 %), que paga el proceso.
- Los resultados obtenidos a nivel de laboratorio fueron corroborados a nivel piloto, por lo cual, pueden ser escalados a nivel industrial.

#### VI. AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento al Ing. Javier Tovar en nombre de los directivos de la empresa Nueva Oroya por haberme permitido la realización de este trabajo, al personal del área de Investigación y Desarrollo, a la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Mayor de San Marcos por la publicación de este artículo.

#### VII. REFERENCIAS

- Aracena, A., Rodríguez, E., & Jerez, O. (2020). Enargite leaching under ammoniacal media with sodium persulfate and consecutive precipitation of As/Cu with Na<sub>2</sub>S/NaHS. *Hydrometallurgy*, 192, 105290. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROMET.2020.105290>



- Bogdanović, G. D., Petrović, S., Sokić, M., & Antonijević, M. M. (2020). Chalcopyrite leaching in acid media: a review. *Metallurgical and Materials Engineering*, 26(2), 177–198. <https://doi.org/10.30544/526>
- Canfield, P. C., & Bud'ko, S. L. (2010). FeAs-Based Superconductivity: A Case Study of the Effects of Transition Metal Doping on BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>. *Http://Dx.Doi.Org/10.1146/Annurev-Conmatphys-070909-104041*, 1, 27–50. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-CONMATPHYS-070909-104041>
- Conner, K. D., & Anderson, C. G. (2015). *Pressure oxidation of enargite concentrates containing gold and silver* (Patent No. US2015123030 (A1)). [https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=20150507&DB=EPODOC&locale=en\\_EP&CC=US&NR=2015123030A1&KC=A1&ND=4#](https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=20150507&DB=EPODOC&locale=en_EP&CC=US&NR=2015123030A1&KC=A1&ND=4#)
- Dou, A. (2016). Pressure Oxidation Leaching of Gold-Antimony Alloy. *Rare Metal Technology* 2016, 109–120. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48135-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48135-7_11)
- Lane, D. J., Cook, N. J., Grano, S. R., & Ehrig, K. (2016). Selective leaching of penalty elements from copper concentrates: A review. *Minerals Engineering*, 98, 110–121. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2016.08.006>
- Li, T., Zhang, Y., Zhang, B., Zhang, J., & Qin, W. (2018). Selective leaching of arsenic from enargite concentrate using alkaline leaching in the presence of pyrite. *Hydrometallurgy*, 181, 143–147. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROMET.2018.09.010>
- Li, W., Han, J., Liu, W., Jiao, F., Wang, H., & Qin, W. (2021). Separation of arsenic from lead smelter ash by acid leaching combined with pressure oxidation. *Separation and Purification Technology*, 273, 118988. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2021.118988>
- Llovo, I. F., Carballeira, C., Sónora, D., Pereiro, A., Ponte, J. J., Salem-Sugui, S., Sefat, A. S., & Mosqueira, J. (2021). Multiband effects on the upper critical field angular dependence of 122-family iron pnictide superconductors. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90858-4>
- Massardo, Z., & Rous, N. (2019). *Estudio de estabilización de arsénico del botadero Montecristo a la forma de scorodita* [Universidad de Concepción, Chile]. <http://repositorio.udec.cl/xmlui/handle/11594/3532>
- Mondal, M., Manoli, K., & Ray, A. K. (2020). Removal of arsenic(III) from aqueous solution by concrete-based adsorbents. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 98(1), 353–359. <https://doi.org/10.1002/CJCE.23589>
- Mosweu, G. (2014). *A Study of Flotation and Leaching Behaviour of Bornite and Chalcopyrite* [Queens University]. <https://qspace.library.queensu.ca/handle/1974/8551>
- Neustroev, V. I., Karimov, K. A., Naboichenko, S. S., & Kovyazin, A. A. (2015). Autoclave Leaching of Arsenic from Copper Concentrate and Matte. *Metallurgist* 2015 59:1, 59(1), 177–179. <https://doi.org/10.1007/S11015-015-0080-Y>
- Nicol, M. J. (2020). The role and use of hydrogen peroxide as an oxidant in the leaching of minerals. 1. acid solutions. *Hydrometallurgy*, 193, 105328. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROMET.2020.105328>
- Padilla, R., Girón, D., & Ruiz, M. C. (2005). Leaching of enargite in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>–NaCl–O<sub>2</sub> media. *Hydrometallurgy*, 80(4), 272–279. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROMET.2005.08.006>
- Padilla, R., Rodríguez, G., & Ruiz, M. C. (2010). Copper and arsenic dissolution from chalcopyrite–enargite concentrate by sulfidation and pressure leaching in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>–O<sub>2</sub>. *Hydrometallurgy*, 100(3–4), 152–156. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROMET.2009.11.006>
- Partha, J. (2012). *Removal Of Arsenic ( Iii ) From Water With A New Solid-Supported Thiol* [University of Kentucky ]. [https://uknowledge.uky.edu/chemistry\\_etds/11](https://uknowledge.uky.edu/chemistry_etds/11)
- Rasaki, S. A., Thomas, T., & Yang, M. (2020). Iron based chalcogenide and pnictide superconductors: From discovery to chemical ways forward. *Progress in Solid State Chemistry*, 59, 100282. <https://doi.org/10.1016/J.PROGSOLIDSTCHEM.2020.100282>
- Seitz, A. E., Eckhardt, M., Sen, S. S., Erlebach, A., Peresyphkina, E. v., Roesky, H. W., Sierka, M., & Scheer, M. (2017). Different Reactivity of As<sub>4</sub> towards Disilenes and Silylenes. *Angewandte Chemie International Edition*, 56(23), 6655–6659. <https://doi.org/10.1002/ANIE.201701740>
- Sun, Q., Cheng, H., Mei, X., Liu, Y., Li, G., Xu, Q., & Lu, X. (2020). Efficient Synchronous Extraction of Nickel, Copper, and Cobalt from Low–Nickel Matte by Sulfation Roasting–Water Leaching Process. *Scientific Reports* 2020 10:1, 10(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66894-x>
- Tadashi Chambers, B. (2012). *An investigation into the sulphation roasting of enargite concentrates* [Queen's University]. <https://www.proquest.com/openview/24d4aec876f01a9c191dbd5cfc25c59/1?pq-origsite=scholar&cbl=18750>
- Wang, Y., Rong, Z., Tang, X., Cao, S., Chen, X., Dang, W., & Wu, L. (2019). The design of scorodite@FeOOH core-shell materials and its stability treatment for arsenide. *Applied Surface Science*, 496, 143719. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2019.143719>
- Zhao, K., Mu, Q. G., Ruan, B. bin, Liu, T., Pan, B. J., Zhou, M. H., Zhang, S., Chen, G. F., & Ren, Z. A. (2020). Synthesis and superconductivity of a novel quasi-one-dimensional ternary molybdenum pnictide Cs<sub>2</sub>Mo<sub>3</sub>As<sub>3</sub>. *APL Materials*, 8(3), 031103. <https://doi.org/10.1063/1.5139472>
- Zhu, D., Wu, T., Guo, Z., Pan, J., & Li, Z. (2016). Studies on Leaching of Oxidized Copper Ore from South America. *Characterization of Minerals, Metals, and Materials* 2016, 337–344. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48210-1\\_41](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48210-1_41)