

REPROCESAMIENTO DE COLAS SULFUROSAS CON BAJO CONTENIDO DE ESTAÑO Y PLATA COMO ALTERNATIVA DE REMEDIACIÓN AMBIENTAL, CON UN ENFOQUE DE ECONOMÍA CIRCULAR

Octavio Hinojosa Carrasco¹

Gerardo Zamora Echenique²

¹ Universidad Técnica de Oruro – Carrera de Metalurgia y Materiales – Dirección e Laboratorio de Concentración de Minerales

² Universidad Técnica de Oruro – Carrera de Metalurgia y Materiales – ORCID 0000-0002-0245-4044

RESUMEN

El presente trabajo evaluó el retratamiento de colas como alternativa de remediación ambiental del sitio de su disposición con el objetivo de recuperar estaño y plata mediante técnicas de flotación y concentración gravimétrica, considerando además aspectos ambientales y de economía circular.

Se aplicaron dos alternativas experimentales. La **alternativa 1**, con granulometría relativamente gruesa, permitió recuperar plata mediante flotación de sulfuros y obtener un concentrado de estaño aceptable en mesa; sin embargo, la recuperación total de Sn fue baja debido a la limitada liberación mineralógica y al arrastre de estaño hacia el concentrado sulfurado. La **alternativa 2**, con molienda fina, mostró mejores resultados metalúrgicos, logrando mayor selectividad en flotación, mejor recuperación de estaño mediante preconcentración gravimétrica o centrífuga en Falcon y concentración gravimétrica en mesa vibrante, obteniendo un concentrado de alta calidad comercial.

Finalmente, el estudio demuestra que el retratamiento de colas se constituye en una alternativa a la remediación ambiental, alineada con la **economía circular**, ya que permite transformar residuos mineros en recursos aprovechables, generando beneficios económicos y contribuyendo a una gestión ambientalmente responsable.

Palabras clave: Preconcentración, flotación, concentración, economía circular

This study evaluated the reprocessing of tailings as an environmental remediation alternative for the tailings disposal site, with the aim of recovering tin and silver using flotation and gravimetric concentration techniques, while also taking into account environmental and circular economy considerations.

Two experimental alternatives were applied. Alternative 1, with relatively coarse particle size, allowed for the recovery of silver through sulfide flotation and the production of an acceptable tin concentrate; however, the total Sn recovery was low due to limited mineralogical liberation and the carryover of tin into the sulfide concentrate. Alternative 2, with fine grinding, showed better metallurgical results, achieving greater selectivity in flotation, better tin recovery through gravimetric or Falcon centrifugal preconcentration and gravimetric concentration on a vibrating table, yielding a high-quality commercial concentrate.

Finally, the study demonstrates that tailings reprocessing constitutes an alternative to environmental remediation, aligned with the circular economy, as it allows for the transformation of mining waste into usable resources, generating economic benefits and contributing to environmentally responsible management.

Keywords: Preconcentration, flotation, concentration, circular economy

1. INTRODUCCION

La actividad minera constituye una de las principales fuentes de materias primas para el desarrollo industrial y tecnológico, desempeñando un papel fundamental en el crecimiento económico de numerosos países. No obstante, el procesamiento de minerales metálicos genera grandes volúmenes de residuos sólidos,

principalmente en forma de colas o relaves, los cuales son depositados en presas o depósitos de almacenamiento. Estos residuos, aunque considerados históricamente como material sin valor económico, suelen contener concentraciones residuales de elementos metálicos que no fueron recuperados durante los procesos convencionales de beneficio. En este

sentido, los relaves representan simultáneamente un pasivo ambiental y una fuente secundaria de recursos minerales potencialmente aprovechables.

En las últimas décadas, la disminución progresiva de las leyes minerales en yacimientos primarios, el incremento de los costos de operación y las exigencias ambientales más estrictas han impulsado el interés por alternativas tecnológicas orientadas al aprovechamiento integral de los recursos ya extraídos. Bajo este contexto, el retratamiento de colas se presenta como una opción estratégica para recuperar metales valiosos y, al mismo tiempo, reducir el volumen de residuos acumulados y sus impactos asociados. Esta práctica se ha visto favorecida por el avance en tecnologías metalúrgicas, tales como la flotación selectiva, la concentración centrífuga, la lixiviación y otros métodos de separación, que permiten tratar materiales complejos con mayor eficiencia que en décadas anteriores.

Entre los residuos mineros de mayor preocupación se encuentran las colas con alto contenido de sulfuros. Estos minerales sulfurados, tales como pirita, pirrotita, calcopirita, arsenopirita y esfalerita, al entrar en contacto con agua y oxígeno pueden sufrir procesos de oxidación que generan drenaje ácido de mina, liberando metales disueltos y afectando negativamente la calidad de suelos y cuerpos de agua superficiales y subterráneos. En consecuencia, los relaves sulfurados constituyen uno de los pasivos ambientales más críticos dentro de la industria minera, ya que pueden mantener un potencial contaminante activo durante décadas si no son gestionados adecuadamente. Además, su acumulación representa un riesgo geotécnico significativo, particularmente en depósitos antiguos que no fueron diseñados bajo estándares modernos de seguridad.

A pesar de que ciertas colas presentan un bajo contenido de Sn y Ag, su gran volumen acumulado puede convertirlas en una fuente económicamente atractiva si se logra desarrollar un esquema metalúrgico eficiente que permita su recuperación. Sin embargo, el desafío principal radica en la complejidad mineralógica y química del material, ya que la asociación de estos metales con sulfuros puede dificultar su liberación y concentración, incrementando

el consumo de reactivos y reduciendo la selectividad de los procesos de recuperación. En este escenario, surge la necesidad de plantear alternativas integrales que no solo busquen la extracción de valor económico residual, sino que también contribuyan a mitigar el impacto ambiental generado por la disposición de relaves. En este sentido, la economía circular se presenta como un enfoque moderno y sostenible que propone sustituir el modelo tradicional lineal de “extraer, procesar y desechar” por un modelo donde los residuos sean reinsertados como recursos dentro de un ciclo productivo. Aplicado a la minería, este enfoque considera a los relaves como materiales susceptibles de valorización mediante la recuperación de metales y la posible reutilización del material tratado en otras aplicaciones industriales, reduciendo la presión sobre los recursos naturales y disminuyendo la generación de pasivos ambientales.

La incorporación de la economía circular en el retratamiento de colas sulfuradas implica un cambio de paradigma en la gestión minera, donde el relave deja de ser únicamente un residuo para convertirse en una materia prima secundaria. Este enfoque no solo busca maximizar la recuperación de elementos como estaño y plata, sino también minimizar el impacto del material residual final, disminuyendo su potencial de generación de drenaje ácido y reduciendo la movilización de metales contaminantes. De esta forma, el retratamiento sostenible se convierte en una herramienta dual: por un lado, permite recuperar metales de valor comercial; por otro, contribuye a la estabilidad química y ambiental del residuo remanente.

En consecuencia, el presente trabajo se orienta al análisis del retratamiento sostenible de colas sulfuradas con bajo contenido de estaño y plata, considerando tanto la recuperación metalúrgica como la reducción del impacto ambiental bajo un enfoque de economía circular. Se busca evaluar la viabilidad técnica de reprocesar este tipo de colas mediante métodos de concentración adecuados, identificando los factores críticos que afectan la recuperación de metales valiosos, así como el comportamiento del residuo final frente a condiciones que puedan generar

contaminación. Este estudio se justifica por su relevancia económica y ambiental, ya que contribuye a la valorización de recursos minerales secundarios, disminuye la acumulación de relaves y promueve una gestión más responsable y sostenible de los residuos mineros.

En este marco, el presente estudio se desarrolla a partir del caso de una empresa ubicada en la zona industrial de Huajara, la cual dispone actualmente de un volumen acumulado superior a 150.000 toneladas de relaves sulfurosos, con contenidos residuales de plata y estaño. Este material presenta una granulometría relativamente fina, con tamaños predominantemente menores a 0,5 mm, característica que puede favorecer ciertos procesos de concentración, aunque también implica desafíos metalúrgicos asociados a la liberación mineral y al comportamiento de las partículas ultrafinas durante el tratamiento.

Para la ejecución de los ensayos metalúrgicos preliminares, se recibió una muestra representativa denominada “colas”, con un peso aproximado de 250 kilogramos, constituida por fracciones de tamaño máximo de 0,5 mm, correspondiente a los granos más gruesos del conjunto. Esta muestra fue destinada a la realización de pruebas de preconcentración centrífuga y concentración gravimétrica, considerando la posibilidad de recuperar minerales de alta densidad como la casiterita y concentrar fases portadoras de plata asociadas a sulfuros.

Las observaciones realizadas mediante estereomicroscopía, luego de un proceso de limpieza y lavado adecuado en chua, evidenciaron una presencia apreciable de sulfuros de hierro, presumiblemente dominados por pirita y/o pirrotita. Asimismo, tras un lavado más insistente, se identificaron pequeñas cantidades de minerales pesados oxidados, los cuales, por su densidad y aspecto, podrían corresponder a casiterita. Sin embargo, debido a las limitaciones del análisis macroscópico, no fue posible diferenciar con certeza la presencia de otros sulfuros metálicos. También se constató una proporción significativa de ganga, principalmente compuesta por cuarzo y silicatos, lo cual sugiere que la recuperación eficiente de Sn y Ag dependerá de la selectividad del método

de concentración y del grado de liberación alcanzado.

2. JUSTIFICACION

El presente estudio se justifica por su relevancia en tres dimensiones principales: económica, ambiental y tecnológica-social. Desde el punto de vista económico, el retratamiento de colas representa una oportunidad para recuperar estaño y plata contenidos en relaves previamente descartados. Estos metales poseen alta demanda en mercados industriales y tecnológicos, por lo que su recuperación desde fuentes secundarias puede contribuir a mejorar la rentabilidad de operaciones mineras existentes o generar nuevas oportunidades de aprovechamiento sin necesidad de incrementar la extracción de mineral primario. Asimismo, el reprocesamiento de colas permite optimizar el uso de recursos ya explotados, reduciendo costos asociados a nuevas actividades de exploración, explotación y molienda.

Desde el punto de vista ambiental, el alto contenido de sulfuros en las colas constituye un riesgo significativo debido a su potencial de generar drenaje ácido de mina y liberar metales contaminantes. El retratamiento puede contribuir a reducir la masa de sulfuros reactivos, estabilizar químicamente el residuo final o transformar el material en un producto de menor peligrosidad ambiental. Por tanto, esta investigación se orienta a aportar soluciones que disminuyan la carga ambiental de depósitos de relaves, favoreciendo una minería más responsable y sostenible.

Desde el punto de vista tecnológico y social, el estudio es relevante debido a la creciente presión normativa y comunitaria sobre la gestión segura de relaves. La aplicación de principios de economía circular en minería es un enfoque moderno que promueve la reutilización y valorización de residuos, lo cual está alineado con tendencias globales de sostenibilidad y con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Además, la implementación de estrategias de retratamiento sostenible puede contribuir a reducir conflictos socioambientales asociados a pasivos mineros, mejorar la percepción pública de la actividad minera y fortalecer la licencia social para operar.

En consecuencia, esta investigación es pertinente porque propone analizar el

retratamiento de colas sulfurosas no solo como una alternativa metalúrgica, sino como una estrategia integral que busca recuperar valor económico y reducir impactos ambientales, contribuyendo a la transición hacia un modelo de minería circular.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Evaluar el retratamiento sostenible de colas con bajo contenido de estaño y plata y alto contenido de sulfuros, mediante procesos metalúrgicos adecuados, con el fin de recuperar minerales valiosos y mitigar impactos ambientales bajo un enfoque de economía circular.

3.2. Objetivos específicos

- Realizar la caracterización física y química de las colas sulfurosas, determinando la distribución de tamaños, composición elemental de Sn, Ag asociada a los sulfuros.
- Evaluar alternativas de retratamiento metalúrgico (preconcentración gravimétrica o centrifuga, concentración,

flotación u otras tecnologías aplicables) para la recuperación de estaño y plata.

- Optimizar parámetros operacionales del proceso seleccionado (granulometría, reactivos, pH, tiempo de residencia, densidad de pulpa u otros), con el fin de maximizar la recuperación y selectividad.
- Determinar la reducción del contenido de sulfuros en el residuo final y su influencia en la disminución del riesgo de drenaje ácido de mina.
- Evaluar el retratamiento desde una perspectiva de economía circular, considerando la valorización del residuo, reducción de pasivos ambientales y potencial reutilización del material tratado.

3. EXPERIMENTACIÓN METALÚRGICA

El flujograma experimental que se diseñó para llevar adelante las pruebas de preconcentración se muestra en la figura 1.

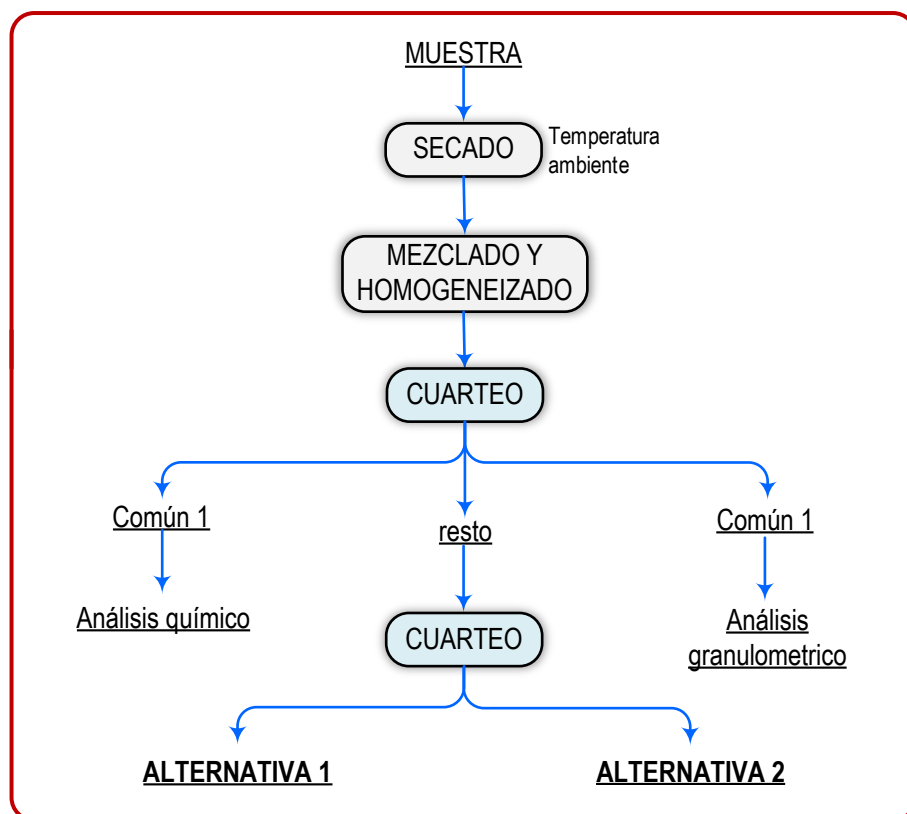


Figura 1.- Flujograma experimental de la parte preliminar de la preparación de la muestra

4. RESULTADOS Y COMENTARIOS

4.1. ANALISIS QUIMICO DEL COMUN

La muestra, luego de efectuar una adecuada mezcla y homogeneización, según el flujograma de la figura 1, fue conducida a un cuarteo en el que se obtuvieron muestras

para las pruebas experimentales y también para el análisis químico; el resultado de este último es el siguiente:

<u>Elemento</u>	<u>Ley,</u>
Estaño	0.80%
Plata	163 g/t
Azufre	19.17%

El contenido de estaño y plata, en la muestra común, es interesante tomando en cuenta

que se tratan de colas; de todas maneras, estos contenidos de estaño y plata deberán ser ratificados o modificados a través de cálculos efectuados en los diferentes balances metalúrgicos de las pruebas experimentales.

4.2. ANALISIS GRANULOMETRICO

Con la muestra común 2, se llevó a cabo el análisis granulométrico de la muestra; el resultado alcanzado se muestra a continuación.

Tabla 1.- Análisis granulométrico de la muestra colas

Tamaño de grano, Malla Ty	Peso %	E S T A Ñ O		P L A T A		A Z U F R E	
		Ley, %	%Dist.	Ley, g/t	%Dist.	Ley, %	%Dist.
+35#	5,51	0,74	5,01	130	4,18	19,33	5,11
-35# +48#	6,83	0,54	4,53	135	5,38	7,16	2,34
-48# +65#	10,01	0,77	9,47	182	10,62	10,68	5,13
-65# +100#	9,78	0,69	8,29	167	9,52	15,87	7,44
-100# +150#	15,66	0,95	18,27	160	14,61	21,44	16,10
-150# +200#	11,64	0,76	10,86	164	11,13	23,05	12,86
-200# +270#	11,25	0,78	10,78	179	11,74	24,74	13,34
-270# +325#	3,18	0,95	3,71	172	3,19	16,33	2,49
-325# +400#	1,94	0,98	2,33	176	1,99	30,55	2,84
-400#	24,20	0,90	26,75	196	27,65	27,88	32,35
Cabeza calcul.	100,00	0,81	100,00	172	100,00	20,86	100,00
Cabeza ensay.		0,80		163		19,17	

Con estos valores se construyen los siguientes dos gráficos:

De la figura 2, se puede establecer los siguientes datos:

$$d_{80} = 230 \text{ micrones (0.23 mm)}$$

$$d_{50} = 100 \text{ micrones (0.10 mm)}$$

Por ende, el otro gráfico que se puede elaborar con la información que se tiene en la tabla 1, se encuentra en la figura 3.

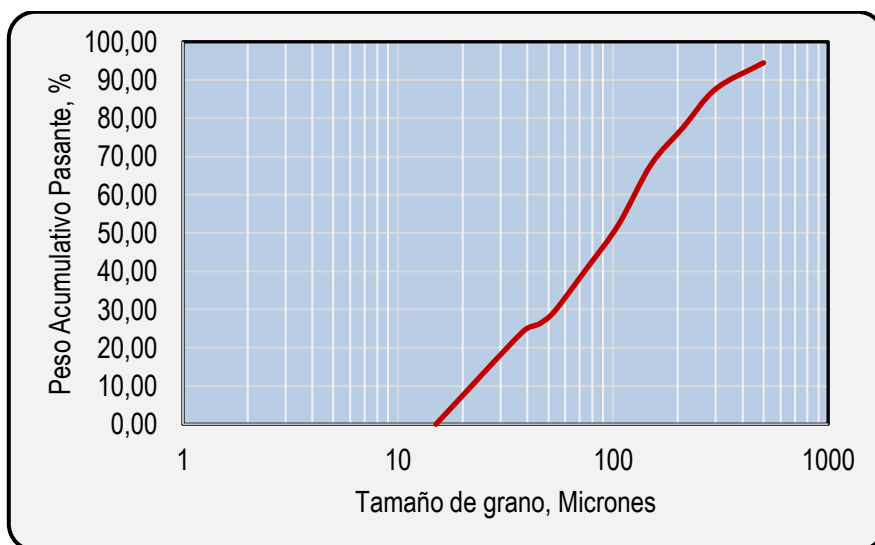


Figura 2.- Representación gráfica del análisis granulométrico de la muestra "colas"

A partir de estos resultados, tabla 1 y figura N° 3, se puede discernir lo siguiente,

- La muestra, "colas", sometida a un análisis de caracterización

granulométrica, presenta una distribución de tamaños muy amplia, es decir, que hay granos

gruesos y muy finos en un amplio intervalo.

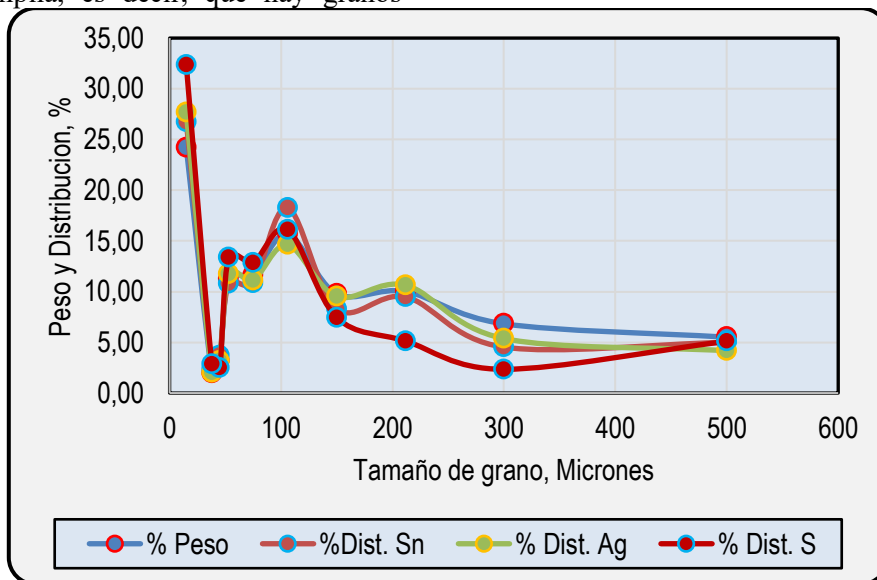


Figura N° 3.- Diagrama de la variación del %Peso y %Distribución Sn por fracciones granulométricas, muestra "colas"

- La fracción muy fina, <400 Mallas Tyler, es abundante y aunque posiblemente involucre a partículas desde <37 micrones a 0 micrones, pero en conjunto representan una fracción granulométrica muy copiosa (24.2% en peso) lo que hace que el diagrama de distribución, en la figura 3, muestre un diagrama bimodal con dos picos, uno para partículas <37 micrones y otro para partículas entre <100# y >270# (0.15 mm y 0.053 mm).
- Las curvas de distribución de estaño, plata y azufre (sulfuros) tienen las mismas características que la distribución del peso por lo que no es posible descartar alguna fracción por su bajo contenido de estaño o plata.
- Los métodos de retratamiento de estas colas podrán ser muy efectivos si se fracciona el común en dos o tres fracciones granulométricas para tratarlas por separado.
- Considerando las leyes de cabeza (0.80% Sn; 163 g Ag/t y 19.17% S)

se ve que hay gran abundancia de sulfuros; esto limita o condiciona la aplicación de métodos de procesamiento; por ejemplo, una gravimetría centrífuga requeriría primero de una separación de sulfuros y la recuperación de la plata está condicionada a determinar si viene asociada a la galena, a la esfalerita o a las sulfosales.

4.3. PRUEBAS EXPERIMENTALES

Las pruebas experimentales se desarrollaron mediante dos alternativas de tratamiento, diferenciadas principalmente por el grado de liberación mineralógica, condicionado por la granulometría de alimentación. En ambos casos, el objetivo fue recuperar los valores de plata y estaño presentes en las colas, aplicando una secuencia de flotación y concentración gravimétrica.

4.3.1. ALTERNATIVA 1

En esta alternativa, la muestra fue tratada con una reducción de tamaño limitada, donde solo una fracción menor alcanzó granulometría inferior a 48 mallas Ty (0.30 mm). El flujograma experimental, de esta alternativa, se muestra en la figura 2

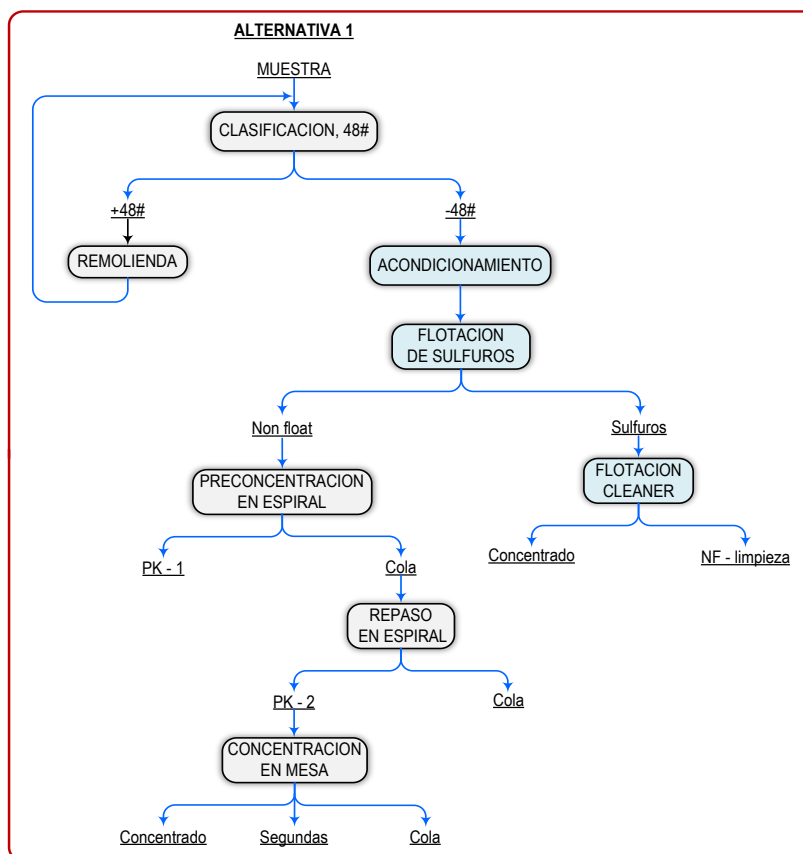


Figura 2.- Flujograma experimental seguido en la alternativa 1

4.3.1.1. FLOTACION DE SULFUROS

La flotación de sulfuros se planteó debido a que la plata se encuentra principalmente asociada a sulfuros de hierro (pirita y posiblemente arsenopirita u otros sulfuros secundarios). Bajo este criterio, se buscó

recuperar Ag mediante una flotación colectiva, separando el material sulfurado del resto de la ganga.

El resultado de la experimentación de esta etapa se muestra en el siguiente balance metalúrgico:

Tabla 2.- Balance metalúrgico de la etapa de flotación de sulfuros

Productos	Peso %	E S T A Ñ O		P L A T A		A Z U F R E	
		Ley, %	% Dist.	Ley, g/t	% Dist.	Ley,%	% Dist.
Conc. sulfuroso	11,25	1,66	23,24	615	39,60	41,25	22,00
NF-limpieza	42,38	0,58	30,59	156	37,84	34,25	68,81
Espuma rougher	53,63	0,81	53,83	252	77,44	35,72	90,81
Non float	46,37	0,80	46,17	85	22,56	4,18	9,19
Cabeza calcul.	100,00	0,80	100,00	175	100,00	21,09	100,00
Cabeza ensay.		0,82		163		21,67	

De la tabla 2, se establece que, el concentrado sulfuroso contiene el 77,44% de la distribución de plata, con una ley de 252 g/t Ag; sin embargo, esta espuma también arrastra una porción importante del estaño, ya que se observa que en la espuma

rougher se concentra 53,83% de la distribución de Sn.

Este comportamiento evidencia que el estaño no se encuentra completamente libre como casiterita pura, sino que una fracción significativa está asociada o atrapada en partículas mixtas con sulfuros, lo que

provoca su arrastre hacia el concentrado sulfurado. Como consecuencia, el non float, que es el producto destinado al tratamiento gravimétrico para recuperar estaño, solo conserva 46,17% de la distribución total de Sn, limitando fuertemente la recuperación global posterior. En resumen, aunque la flotación resulta efectiva para recuperar plata, se convierte en un cuello de botella para el estaño debido a la falta de liberación.

Tabla 2.- Balance metalúrgico de la preconcentración rougher + scavenger en espiral,

Productos	P E S O, %		E S T A Ñ O			P L A T A			A Z U F R E		
	Etapas	Total	%Sn	%D.E	%D.T	g/t	%D.E	%D.T	% S	%D. E	%D. T
Preconcentr.- 1	17,05	7,91	1,78	37,94	17,51	89	17,85	4,03	4,85	19,78	1,82
Preconcentr.- 2	14,28	6,62	1,31	23,44	10,82	85	14,28	3,22	4,53	15,48	1,42
Total precon.	31,33	14,53	1,57	61,37	28,33	87	32,13	7,25	4,70	35,26	3,24
Cola	68,67	31,84	0,45	38,63	17,83	84	67,87	15,31	3,94	64,74	5,95
Cabeza calcul.	100,00	46,37	0,80	100,00	46,17	85	100,00	22,56	4,18	100,00	9,19

Desde el punto de vista metalúrgico, los índices de esta etapa son aceptables, ya que existe un enriquecimiento importante respecto a la cabeza; sin embargo, debe resaltarse que la recuperación global total del estaño ya se encuentra limitada por la flotación previa: aun cuando la espiral recupere más del 60% del Sn del non float, este non float solo representa el 46,17% del Sn total inicial.

En cuanto a la plata y el azufre, su distribución se concentra mayoritariamente

4.3.1.2. PRECONCENTRACION EN ESPIRAL A PARTIR DEL NON FLOAT

Siguiendo el flujograma de la figura 2, el non float de la flotación de sulfuros es conducido a la etapa de preconcentración usando para ello espirales. El resultado logrado es el siguiente:

en las colas finales, lo cual era esperado debido a que estos elementos están principalmente asociados a sulfuros, los cuales fueron removidos en la flotación inicial

4.3.1.3. CONCENTRACION EN MESA A PARTIR DEL PRECONCENTRADO

Tratando de obtener un concentrado final de calidad, el preconcentrado de la anterior etapa, es conducido a concentración en mesa vibrante (ver flujograma de la figura 2), el resultado es el siguiente:

Tabla 3.- Balance metalúrgico de la etapa de concentración en mesa a partir del preconcentrado

Productos	P E S O, %		E S T A Ñ O			P L A T A			A Z U F R E		
	Etapas	Total	%Sn	%D.E	%D. T	g/t	%D.E	%D. T	% S	%D. E	%D. T
Concentrado Sn	2,65	0,38	35,44	59,93	16,98	92	2,80	0,20	4,85	2,73	0,09
Segundas	5,13	0,75	3,66	11,98	3,39	84	4,94	0,36	4,15	4,53	0,15
Cola	92,22	13,40	0,48	28,09	7,96	87	92,26	6,69	4,73	92,74	3,00
Cabeza calcul.	100,00	14,53	1,57	100,00	28,33	87	100,00	7,25	4,70	100,00	3,24

El producto final alcanzado es aceptable, se logra un concentrado con una ley de 35,44% Sn y una recuperación etapa de casi 60%; sin embargo, debe resaltarse que la recuperación global total del estaño, como se indicó anteriormente; por tanto, aun cuando en las etapas de preconcentración y posterior concentración en mesa se logran recuperaciones etapa de alrededor de 60%, la

recuperación total final es apenas del 16,98%, valor muy bajo que puede incidir negativamente un probable tratamiento industrial

4.3.2. ALTERNATIVA 2

Esta alternativa se llevó a cabo con una granulometría “fina”, en efecto, la muestra fue clasificada en malla 100 y el sobre tamaño remolido a esta fracción

granulométrica, siguiendo los pasos que se detallan el flujograma de la figura 3.

4.3.2.1. FLOTACION DE SULFUROS

El resultado de la experimentación de esta etapa se muestra en el siguiente balance metalúrgico:

Tabla 2.- Balance metalúrgico de la etapa de flotación de sulfuros

Productos	Peso %	E S T A Ñ O		P L A T A		A Z U F R E	
		Ley, %	% Dist.	Ley, g/t	% Dist.	Ley,%	% Dist.
Conc. sulfuroso	13,56	0,65	10,62	665	56,40	42,06	27,90
NF-limpieza	32,87	0,35	13,86	155	31,87	39,55	63,59
Espuma rougher	46,43	0,44	24,48	304	88,27	40,28	91,48
Non float	53,57	1,17	75,52	35	11,73	3,25	8,52
Cabeza calcul.	100,00	0,83	100,00	160	100,00	20,44	100,00
Cabeza ensay.		0,82		163		21,67	

La espuma rougher recupera: 88,27% de la plata, con ley de 304 g/t Ag, mientras que el estaño arrastrado en esta espuma disminuye a 24,48%; esto significa que la molienda fina permitió una separación más selectiva, logrando que el estaño quede preferentemente en el non float, aumentando la disponibilidad para su recuperación gravimétrica.

El non float contiene 75,52% de la distribución total de Sn. Este resultado constituye un avance decisivo, ya que permite mejorar significativamente la recuperación global de estaño en las etapas posteriores.

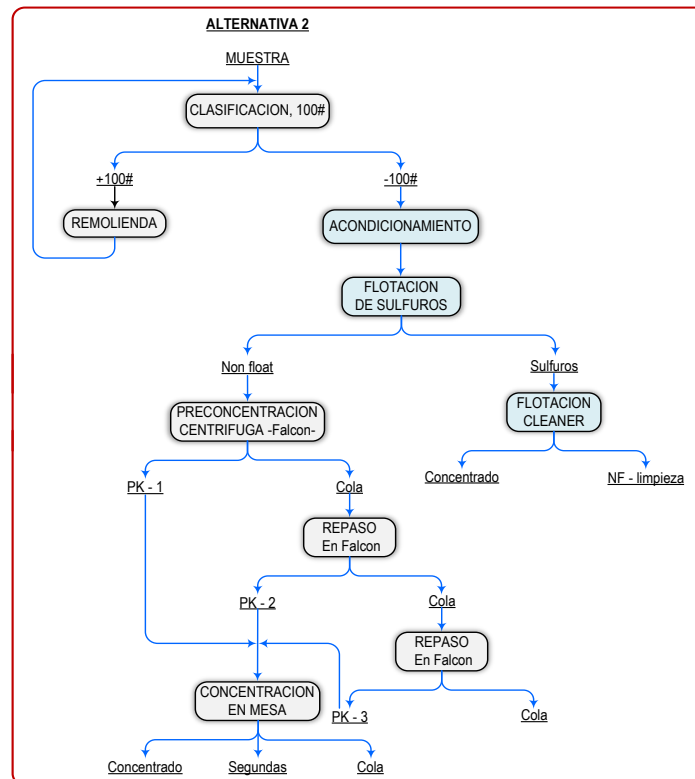


Figura 3.- Flujograma experimental seguido en la ALTERNATIVA 2

4.3.2.2. PRECONCENTRACION CENTRIFUGA EN EL CONCENTRADOR FALCON

El non float fue sometido a preconcentración centrífuga en un equipo Falcon, debido a que este tipo de concentrador es altamente

eficiente para recuperar partículas finas de alta densidad como la casiterita. Siguiendo el flujograma de la figura 3, el resultado logrado es el siguiente:

Tabla 2.- Balance metalúrgico de la preconcentración centrífuga en Falcon, a partir del non float

Productos	P E S O, %		E S T A Ñ O			P L A T A			A Z U F R E		
	Etapas	Total	%Sn	%D.E	%D.T	g/t	%D.E	%D.T	% S	%D. E	%D. T
Preconcentr.-1	13,22	7,08	2,75	35,66	26,93	38	14,71	1,73	5,28	21,48	1,83
Preconcentr.-2	11,89	6,37	2,02	23,56	17,79	25	8,70	1,02	4,26	15,58	1,33
Preconcentr.-3	10,05	5,38	1,88	18,53	13,99	28	8,24	0,97	3,58	11,07	0,94
Total preconcon.	35,16	18,84	2,25	77,74	58,71	31	31,65	3,71	4,45	48,13	4,10
Cola	64,84	34,73	0,35	22,26	16,81	36	68,35	8,02	2,60	51,87	4,42
Cabeza calcul.	100,00	53,57	1,02	100,00	75,52	34	100,00	11,73	3,25	100,00	8,52

Los resultados muestran: un preconcentrado total de 35,16% en peso, ley promedio de 2,25% Sn y recuperación etapa de 77,74% del Sn contenido en el non float. Estos valores reflejan un desempeño metalúrgico elevado, confirmando que la casiterita (u otras fases portadoras de Sn) responden favorablemente a la concentración centrífuga cuando se encuentran liberadas. Las condiciones de operación del Falcon (fuerza centrífuga: 150 G's; presión de agua

de lavado: 3 psi y 25% sólidos en la alimentación) resultaron adecuadas para maximizar recuperación sin generar un arrastre excesivo de ganga liviana.

4.3.2.3. CONCENTRACION EN MESA A PARTIR DEL PRECONCENTRADO

El preconcentrado logrado en la centrífuga Falcon es conducido a limpieza en la mesa vibrante, una especie de up grading (ver figura 3). El resultado se detalla en el siguiente balance metalúrgico:

Tabla 3.- Balance metalúrgico de la etapa de concentración en mesa a partir del preconcentrado

Productos	P E S O, %		E S T A Ñ O			P L A T A			A Z U F R E		
	Etapas	Total	%Sn	%D.E	%D.T	g/t	%D.E	%D.T	% S	%D. E	%D. T
Concentrad Sn	2,75	0,52	56,87	69,48	40,79	41	3,72	0,14	6,12	3,87	0,16
Segundas	4,33	0,82	4,71	9,06	5,32	30	4,29	0,16	4,40	4,38	0,18
Cola	92,92	17,50	0,52	21,46	12,60	30	91,99	3,41	4,30	91,76	3,76
Cabeza calcul.	100,00	18,84	2,25	100,00	58,71	30	100,00	3,71	4,35	100,00	4,10

Este concentrado posee características claramente comerciales, con ley superior a 50% Sn, lo que indica que el circuito Falcon + mesa es técnicamente viable para producir un concentrado de calidad. Aunque la recuperación total de 40,79% podría considerarse moderada, debe destacarse que se trata de colas históricas, donde parte del mineral valioso se encuentra en fracciones ultrafinas o en granos mixtos difíciles de recuperar. Por ello, el resultado obtenido es metalúrgicamente significativo y merece un análisis económico posterior.

5. CONSIDERACIONES FINALES DE LAS PRUEBAS REALIZADAS

Los resultados obtenidos en ambas alternativas permiten concluir que los

minerales valiosos presentes en las colas no se encuentran completamente liberados, sino que forman partículas compuestas o granos mixtos, tanto con sulfuros como con óxidos. Esta hipótesis se confirma al comparar los resultados: la alternativa 2, al incorporar remolienda por debajo de aproximadamente 150 μm , incrementa notablemente la liberación mineralógica, generando mejoras sustanciales en:

- Selectividad de flotación de sulfuros (mayor recuperación de Ag y menor arrastre de Sn)
- Recuperación gravimétrica de Sn en Falcon y mesa
- Calidad final del concentrado de estaño

Asimismo, el concentrado sulfurado de plata obtenido en alternativa 2 muestra mejores características metalúrgicas y puede considerarse un subproducto con valor económico, ya sea para comercialización directa o para un tratamiento metalúrgico posterior (oxidación, tostación, lixiviación o procesos pirometalúrgicos), siempre bajo estrictos controles ambientales.

Desde el punto de vista ambiental, debe destacarse que las colas finales aún contienen remanentes de sulfuros, lo que implica un riesgo potencial de generación de drenaje ácido de roca (DAR) si no se gestionan adecuadamente. Por ello, cualquier implementación industrial debe contemplar medidas de estabilización y disposición controlada, tales como:

- Encapsulamiento o disposición en depósitos impermeabilizados,
- Neutralización con materiales alcalinos,
- Monitoreo de pH y metales disueltos,
- Eventual reaprovechamiento de fracciones sulfuradas.

Finalmente, desde la perspectiva de economía circular, el retratamiento de colas permite transformar un pasivo ambiental en una fuente secundaria de materias primas, generando beneficios simultáneos:

- Recuperación de concentrados comercializables (Sn y Ag),
- Reducción del volumen y peligrosidad del pasivo minero,
- Disminución del riesgo ambiental asociado al DAR,
- Generación de valor económico a partir de residuos históricos.

En este contexto, la alternativa 2 representa la ruta con mayor potencial de implementación industrial, aunque su viabilidad definitiva debe sustentarse mediante un análisis económico-financiero considerando costos de molienda fina, consumo de agua, energía, reactivos, y comercialización de concentrados.

6. CONCLUSIONES

De los resultados alcanzados en las pruebas experimentales, del análisis efectuado y de las observaciones durante las pruebas

experimentales, se puede concluir lo siguiente:

- Las colas evaluadas contienen valores recuperables de estaño y plata, confirmando el potencial del retratamiento como alternativa de aprovechamiento de pasivos mineros.
- La variable más influyente en la eficiencia del proceso fue la granulometría, ya que una molienda más fina mejoró significativamente la liberación mineralógica y, por tanto, los resultados metalúrgicos.
- La alternativa 1 permitió obtener un concentrado de Sn aceptable, pero presentó una baja recuperación total de estaño, debido al arrastre de Sn hacia el concentrado sulfurado y a la insuficiente liberación del mineral.
- La alternativa 2 mostró los mejores resultados, logrando mayor recuperación de Ag en flotación y una recuperación superior de Sn mediante Falcon y mesa vibrante, obteniéndose un concentrado final de alta ley y comercializable.
- El comportamiento metalúrgico evidencia que parte del Sn se encuentra asociado a sulfuros y ganga, lo cual exige molienda adecuada y equipos eficientes de concentración para maximizar su recuperación.
- Desde el punto de vista ambiental, el retratamiento reduce el volumen de relaves y el riesgo de impactos como el drenaje ácido, aunque las colas finales deben disponerse bajo condiciones controladas.
- En términos de economía circular, el proceso evaluado permite transformar un residuo minero en una fuente secundaria de materias primas estratégicas, generando beneficios económicos por la venta de concentrados y contribuyendo a la mitigación de impactos ambientales asociados a depósitos históricos de relaves.
- En conclusión, la alternativa 2 es la más viable técnica y metalúrgicamente, recomendándose complementar el estudio con evaluación económica y pruebas a mayor escala.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barry Wills, B., & Napier-Munn, T. (2006). *Wills' Mineral Processing Technology*. Elsevier.
- Bian, Z., Miao, X., Lei, S., Chen, S., Wang, W., & Struthers, S. (2012). The challenges of reusing mining and mineral-processing wastes. *Science*, 337, 702–703.
- Corder, G., Golev, A., & Giurco, D. (2015). “Wealth from metal waste”: Translating global knowledge on industrial ecology to metals recycling in Australia. *Minerals Engineering*, 76, 2–9.
- Dold, B. (2014). Evolution of acid mine drainage formation in sulphidic mine tailings. *Minerals*, 4, 621–641.
- Dold, B. (2017). Acid rock drainage prediction: A critical review. *Journal of Geochemical Exploration*, 172, 120–132.
- European Commission. (2020). *Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability*.
- Falagan, C., Grail, B. M., & Johnson, D. B. (2017). New approaches for extracting and recovering metals from mine tailings. *Minerals Engineering*, 106, 71–78.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N., & Hultink, E. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768.
- Lottermoser, B. (2010). *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. Springer.
- Napier-Munn, T. (2015). *The Sustainable Use of Energy in the Mining Industry*. JKMRC Monograph.
- Nordstrom, D. K. (2011). Mine waters: Acidic to circumneutral. *Elements*, 7(6), 393–398.
- UNEP. (2019). *Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want*. United Nations Environment Programme.

Artículo recibido en: 13.04.2026

Artículo aceptado: 28.04.2026

Revista de Medio Ambiente Minero y Minería 11 (1): 27 - 37, JUNIO 2026. ISSN 2519-5352

DESCARBONIZAÇÃO NA MINERAÇÃO DE FERRO: ANÁLISE DA ELETRIFICAÇÃO DE FROTAS DE LAVRA EM OPERAÇÕES DE LARGA ESCALA

Carlos Enrique Arroyo Ortiz¹ ², Royer Luiz Inca ², Adilson Curi¹

¹ Departamento de Engenharia de Minas -UFOP

² Programa de pós-graduação em Engenharia Mineral PPGEM – UFOP

RESUMO

Este artigo analisa a eletrificação de frotas de transporte em minas de ferro a céu aberto como estratégia de descarbonização, abordando três pilares tecnológicos principais: (i) Veículos Elétricos a Bateria (BEV) e célula de combustível a hidrogênio (FCEV), com destaque para o trade-off entre eficiência energética (70–80% BEV vs. 30–40% FCEV) e peso do sistema propulsor (15–30 t de baterias para caminhões classe 240 t); (ii) Sistemas de Trolley Assist, que utilizam rede aérea em rampas de subida para alimentar motores elétricos e recarregar baterias, elevando a velocidade de subida em até 2× e reduzindo o consumo de diesel em ~22%; e (iii) Automação e gestão de energia, onde a condução autônoma maximiza a frenagem regenerativa e o aproveitamento de energia potencial gravitacional — como no caso do Infinity Train da Fortescue, que elimina a necessidade de recarga externa em minas de topo de morro.

A metodologia proposta combina modelagem de ciclo de transporte (rota com 8% de inclinação e 4,5 km de distância), cálculo de emissões comparando diesel (2,68 kg CO₂/L, IPCC) com a matriz elétrica brasileira (predominantemente renovável), análise energética e equação de consumo. Os casos reais analisados — Vale (Brasil/Indonésia) e BHP/Rio Tinto (Pilbara, Austrália) — validam a viabilidade técnica, com desafios adicionais como o calor extremo (>45 °C) que impacta o gerenciamento térmico das baterias. Os principais obstáculos identificados são o CAPEX 1,5–2× superior ao diesel, a demanda de rede acima de 100 MW para minas de grande porte e a necessidade de integração do carregamento rápido ao plano de lavra.