



Universidad Nacional
de Trujillo

Journal of Advanced Mining Modeling (JAMM)

Página web de la revista: <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/jamm/index>
Vol. 1, N° 2, pp. 73-90, Julio – Diciembre 2025



Journal of Advanced
Mining Modeling
(JAMM)

Flotación de minerales de estaño: Una revisión sistemática de mineralogía, depósitos y reactivos en operaciones industriales

José Luis Matos-Vargas^{1*}

¹. Departamento de Ingeniería de Minas / Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú

* Autor de correspondencia: jose.matosv1@unmsm.edu.pe (J. Matos-Vargas)

Recibido 4 de diciembre de 2025

Revisado 4 de diciembre de 2025

Aceptado 27 de diciembre de 2025

Publicado en línea 28 de diciembre de 2025

Resumen

El objetivo de esta investigación fue analizar sistemáticamente la composición de los minerales de estaño, conocer sus depósitos, identificar los colectores necesarios para la flotación y revisar los procesos de flotación empleados por empresas mineras. La metodología utilizada consistió en una búsqueda sistemática de información relacionada con la flotación de minerales de estaño. Los resultados mostraron que la casiterita (SnO_2) y la estannita (CuS-FeS-SnS_2) son los minerales esenciales. La clasificación de los depósitos de estaño se basa en tres grupos: depósitos diseminados, minerales de grano medio-grueso y minerales de estaño de grano grueso. Los colectores necesarios para la flotación de minerales de estaño son ácido arsénico, ácido fosfónico y ácido dicarboxílico. En el proceso de flotación de la mina Minsur se emplean reactivos depresores y colectores; algunos de ellos son el sulfato de cobre (CuSO_4) y el xantato de amilo. En conclusión, es esencial conocer el proceso de flotación del mineral de estaño debido a la gran demanda de este metal.

Palabras clave: Estaño, casiterita, flotación.

Abstract

The objective of this study was to systematically analyze the mineralogical composition of tin-bearing minerals, characterize their deposit types, identify the collectors required for tin flotation, and review the flotation processes applied by mining companies. The methodology consisted of a systematic literature review focused on the flotation of tin minerals. The results indicate that cassiterite (SnO_2) and stannite (Cu-Fe-Sn sulfide) are the principal tin-bearing minerals. Tin deposits are classified into three main categories: disseminated deposits, medium- to coarse-grained ores, and coarse-grained tin ores. The collectors commonly used in the flotation of tin minerals include arsenic acid, phosphonic acid, and dicarboxylic acid-based reagents. In the flotation circuit of the Minsur mine, both depressant and collector reagents are employed; representative examples include copper sulfate (CuSO_4) as an activator and amyl xanthate as a collector. In conclusion, a comprehensive understanding of tin mineral flotation processes is essential due to the growing industrial demand for this metal.

Keywords: Tin, cassiterite, flotation.

1. Introducción

El continuo crecimiento de la economía mundial ha generado una elevada demanda de producción de estaño. El mineral de mayor importancia para su obtención es la casiterita (SnO_2) [1]. El tratamiento de este mineral es relativamente complejo e involucra un conjunto amplio de operaciones unitarias, que incluyen la concentración gravimétrica por etapas [2], el retratamiento mediante remolienda y flotación de sulfuros [3] a partir de relaves gravimétricos, así como el deslamado y la posterior flotación secuencial de sulfuros.

El proceso de beneficio de los minerales de estaño se basa estrictamente en la combinación de preconcentración gravimétrica y flotación. En esta última, se realiza la flotación de sulfuros tanto del concentrado gravimétrico como de las fracciones finas, seguida de la flotación de la casiterita contenida en los relaves de sulfuros una vez deslamados.

La química de la flotación de casiterita (SnO_2) ha sido objeto de estudio durante muchos años. El descubrimiento de que los sulfosuccinatos [4], el ácido fosfónico [5] y el ácido arsénico [6] actúan como colectores selectivos impulsó su incorporación como procesos complementarios a la concentración gravimétrica en las plantas de beneficio de estaño a inicios de la década de 1970. No obstante, pese al esfuerzo continuo de investigación, los avances posteriores han sido relativamente limitados.

En el beneficio industrial de menas de estaño, la casiterita (SnO_2) se recupera principalmente mediante concentración gravimétrica, debido a su elevada densidad relativa frente a los minerales de ganga. En contraste, la flotación de casiterita presenta una ventana operativa más restringida y suele ser más efectiva en fracciones finas; por ello, en plantas de roca dura el circuito se diseña para remover y recuperar la casiterita liberada lo antes posible por gravedad, reduciendo la sobre-molienda y el arrastre de ganga.

Bajo este enfoque, la gravimetría actúa como etapa primaria de preconcentración, mientras que la flotación se aplica posteriormente a las colas del circuito gravimétrico (o a las fracciones ultrafinas y deslamadas) para recuperar partículas finas de SnO_2 que presentan baja eficiencia de separación por gravedad. En la práctica, la flotación funciona como una etapa complementaria (scavenger) que incrementa la recuperación global del estaño, especialmente cuando el Sn se distribuye en rangos finos y ultrafinos.

En la actualidad, la flotación de casiterita sigue considerándose un proceso secundario de recuperación, utilizado principalmente para la concentración de partículas con tamaños inferiores a 40 μm .

El artículo se estructura de la siguiente manera: en la segunda sección se describe la metodología empleada; posteriormente, se presentan los hallazgos relacionados con la composición mineralógica del estaño, la caracterización de los depósitos, los colectores utilizados en flotación y los procesos aplicados en las minas Renison y Minsur, así como en la planta de Huanuni. Finalmente, se exponen las conclusiones y las referencias bibliográficas.

2. Materiales y Métodos

2.1. Metodología documental

La metodología empleada se desarrolló en dos fases principales. La primera consistió en la búsqueda de información actualizada sobre la composición de los distintos minerales de estaño, la descripción de sus depósitos y los colectores utilizados en la flotación de este mineral. La segunda fase se centró en recopilar información sobre los procesos de flotación de minerales de estaño aplicados en la mina Renison, ubicada en Australia, y en Minsur, situada en Perú.

3.- Resultados y análisis de resultados

3.1. Composición de los diferentes minerales de estaño

La casiterita (SnO_2) es el mineral más importante que contiene estaño. Teóricamente, el 78% de su composición corresponde a este metal. Sin embargo, la casiterita suele presentar impurezas, por lo que su contenido de estaño puede variar entre 65% y 78%. Entre las principales impurezas se encuentran tantalio, niobio, titanio y otros elementos, que generalmente aparecen como soluciones sólidas. Estas impurezas pueden influir significativamente en el comportamiento del mineral durante la flotación. Según diversas investigaciones [7] sobre distintos tipos de depósitos de estaño, la casiterita puede clasificarse en tres grupos principales:

Grupo 1: Casiterita presente en vetas pegmatíticas, que contiene principalmente $(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_5$, junto con pequeñas cantidades de wolframita y manganeso. Debido a su fragilidad, este tipo de casiterita tiende a fracturarse durante la molienda. Grupo 2: Casiterita asociada a vetas de cuarzo, con un contenido de wolframita que oscila entre 0 y 3–4%, y alrededor de 1% de $(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_5$. Grupo 3: Asociación de wolframita, vanadio y casiterita, típica de vetas de sulfuros.

El segundo mineral de estaño más relevante es la estannita ($\text{CuS}-\text{FeS}-\text{SnS}_2$). Teóricamente, su composición corresponde a 27.5% de estaño (Sn), 29.9% de azufre (S), 29.5% de cobre (Cu) y 13.1% de hierro (Fe). Los

minerales de estaño con valor económico se presentan en la Tabla 1, mientras que los que no poseen valor económico se muestran en la Tabla 2.

Tabla 1. Lista de minerales de estaño con valor económico

| Mineral | Formula | Contenido Teórico (% Sn) | Densidad específica |
|----------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|
| Casiterita [8] | SnO ₂ | 87,00 | 6,80 – 7,10 |
| Estannita [9] | CuS FeS SnS ₂ | 27,50 | 4,40 |

Tabla 2. Lista de minerales de estaño sin valor económico

| Mineral | Composición | Contenido teórico (%Sn) | Densidad |
|--------------------|---|-------------------------|-------------|
| Colusita [10] | Cu ₃ (As, Sn, V, Fe, Te) S ₄ SnS | 5,00 – 8,90 | 4,40 – 9,60 |
| Herzenbergita [11] | SnS | 78,80 | - |
| Canfieldita [12] | Ag ₈ SnS ₆ | 10,00 | 6,30 |
| Franckelita | PbS SnS ₂ | 9,40 – 17,30 | 3,50 – 5,50 |
| Teallita | 5PbS 2SnS ₂ SbS ₃ | 30,50 | 6,40 |
| Cilindrita [13] | Pb ₃ Sn ₄ Sb ₂ S ₁₄ | 26,60 | 5,40 |
| Arandesita [14] | 3SnSiO ₄ 2SnO ₂ 4H ₂ O | 48,00 – 55,00 | 4,00 |
| Stokesita | H ₂ CaSnSi ₃ O ₁₁ | 26,00 – 43,00 | 3,20 |
| Boratina | SnO ₂ 6B ₂ O ₃ 5H ₂ O | 5,50 | 4,30 |
| Nordenskioldine | CaSn (BO ₂) ₃ | 42,00 | 4,20 |
| Thoreaulita | TaO ₅ SnO ₂ | 15,00 – 17,00 | 7,60 |

3.2 Descripción de los depósitos de estaño

Los depósitos de estaño más importantes son de origen hidrotermal [15], tanto hipotermal como mesotermiales [16]. Los depósitos magmáticos [17], en general, no presentan mineralización significativa de estaño. Este metal también puede encontrarse en depósitos pegmatíticos; sin embargo, el estaño presente en estas pegmatitas puede clasificarse en dos tipos básicos:

a) Lentes de cuarzo-casiterita en granito, donde la casiterita se asocia con topacio, berilo y, en menor proporción, sulfuros.

b) Depósitos de sulfuros, en los cuales el estaño se presenta predominantemente como casiterita acompañada de arsenopirita, pirita, calcopirita y pirrotita. Este tipo de depósitos es común en Sudamérica, especialmente en Perú y Bolivia.

Los depósitos aluviales se originan por la descomposición de los depósitos pegmatíticos de cuarzo-casiterita, dado que la casiterita es un mineral químicamente estable y no suele alterarse. Los depósitos de estaño pueden clasificarse en tres grupos, de acuerdo con su grado de diseminación

Tabla 3. Clasificación de los depósitos de estaño

| Grupo | Tipo de depósito de estaño | Descripción |
|-------|---------------------------------|--|
| 1 | Depósitos diseminados | Los granos de casiterita en estos depósitos tienen tamaños entre 0 y 0,001 mm. La mayoría de la casiterita se encuentra dispersa en una matriz de ganga compuesta por turmalina, cuarzo y aluminosilicatos. La recuperación de casiterita en este tipo de depósitos es muy complicada. |
| 2 | Mineral de grano medio a grueso | En este tipo de mineral, el tamaño de las partículas de casiterita varía desde 1 mm hasta tamaños menores. Estos depósitos suelen ser Pegmatíticos y contienen sulfuros de estaño. |

| | | |
|---|-------------------------------------|--|
| 3 | Minerales de estaño de grano grueso | En este tipo de mineral, el tamaño promedio de los granos de casiterita oscila entre 0,1 y 1 mm o incluso más. |
|---|-------------------------------------|--|

Los minerales sulfurados y las menas de turmalina clorítica pueden dividirse en dos grupos básicos según la composición de minerales diseminados y minerales de grano medio a grueso. En los minerales sulfurados se encuentran pirita [18], pirrotita [19], arsenopirita [20], calcopirita [21], galena [22] y estannita; mientras que minerales como bismuto y esfalerita aparecen con menor frecuencia. En el tipo mineralógico caracterizado por turmalina clorítica, suelen presentarse cantidades significativas de ferrosilicatos [23], turmalina [24] y cloritas. Este tipo de mena generalmente contiene un mayor porcentaje de estaño en comparación con otros tipos y puede alcanzar concentraciones de hasta 2% de Sn.

Los minerales de estaño de grano grueso suelen presentarse en formaciones de casiterita-cuarzo y en pegmatitas. Estas menas pueden constituir estructuras complejas que incluyen diversas especies de ganga. En el caso de las pegmatitas, además del estaño, pueden encontrarse cantidades importantes de tantalio y niobio. Con concentraciones de estaño que varían entre 0 y 5%, los depósitos de roca dura son más ricos en estaño que los depósitos aluviales. Brasil, Canadá, Bolivia, Perú, Estados Unidos y otros países cuentan con este tipo de yacimientos.

3.3. Colectores para la flotación de estaño

Existen pocos colectores adecuados para la flotación de estaño que fueron incorporados en plantas de procesamiento durante la década de 1970; sin embargo, muchos de ellos han sido reemplazados, como el ácido arsénico y el ácido fosfónico, debido a su toxicidad y alto costo. Otros colectores que han sido ampliamente estudiados incluyen el ácido oleico, el oleato de sodio, los ácidos fosfóricos alquilados y los hidroxamatos [25] [26] [27].

Según estudios realizados para recuperar estaño a partir de los relaves gravimétricos de la mina San Rafael, en Perú, se determinó una mezcla colectora altamente efectiva [28], compuesta por un éster fosfórico de succinato. Estos resultados indicaron que el sulfosuccinato de sodio era más eficiente que el ácido arsénico. La casiterita (SnO_2) es un mineral óxido; por tanto, su flotación no se interpreta con el mismo marco que la flotación de sulfuros, donde se emplean colectores tipo tiol con adsorciones características sobre superficies sulfuroosas. En sistemas óxidos, la separación se ve más condicionada por la carga superficial, el potencial zeta y el pH, lo que exige seleccionar colectores y modificadores acordes con ese comportamiento fisicoquímico. En este contexto, es importante señalar que una estrategia ampliamente reportada para la casiterita es la flotación catiónica, definida por el uso de colectores catiónicos típicamente aminas. Dodecilamina y octadecilamina han sido descritas como colectores catiónicos capaces de mejorar la flotabilidad de la casiterita mediante adsorción electrostática e intercambio superficial, aunque con limitaciones de selectividad en menas complejas.

3.3.1. Ácido arsénico

Este colector posee la estructura química mostrada en la Figura 1. La identificación del ácido arsénico como colector selectivo para la flotación de casiterita permitió su introducción en numerosas plantas industriales. El primer uso registrado de este colector ocurrió en la mina Alterberg, en Alemania, a inicios de la década de 1970. Posteriormente, fue empleado en varias operaciones mineras, como Rooiberg y Union Tin (Sudáfrica), así como en las minas de estaño Renison y Cleveland (Australia).

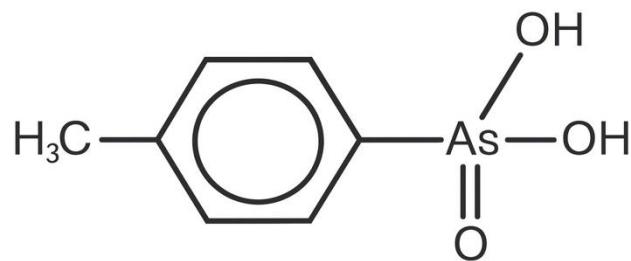


Figura 1. Fórmula estructural del ácido arsénico

Este compuesto es tóxico y, por ello, la empresa Hoechst dejó de fabricarlo en 1973; posteriormente, en 1976, Mitsubishi el único proveedor que aún lo producía también cesó su producción. El metilbencil y una mezcla de ácidos arsénicos p- y o-tolilo han vuelto a generar interés como colectores de casiterita [29] [30]. En la República Popular China, el reactivo comercial denominado MTA, compuesto aproximadamente por una proporción 50:50 de ácido arsénico p-tolilo y o-tolilo, es actualmente la única sustancia utilizada en la flotación de casiterita. Desde el punto de vista químico, el ácido arsénico es un ácido débil dibásico y su desempeño óptimo en flotación se obtiene cuando el pH se mantiene entre 3 y 5. La eficiencia disminuye cuando el pH se encuentra fuera de este intervalo. El efecto del pH en la flotación de estaño con ácido arsénico se muestra en la Figura 2.

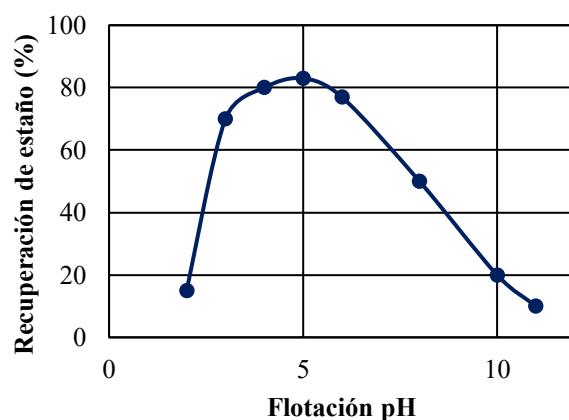


Figura 2. Fórmula estructural del ácido arsénico

Una característica particular de la flotación de casiterita con ácido arsénico es su incapacidad para recuperar partículas de casiterita con tamaños superiores a 40 μm . Por ejemplo, los datos de la mina Renison, en Australia, muestran que la recuperación de casiterita en fracciones mayores de 20 μm se reduce de manera significativa, tal como se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Recuperación de SnO_2 por tamaño de partícula utilizando ácido arsénico

| Fracción de tamaño (μm) | Recuperación (% Sn) |
|--------------------------------------|---------------------|
| 2,00 – 5,00 | 85,00 |
| 5,00 – 15,00 | 87,20 |
| 15,00 – 20,00 | 50,00 |
| 20,00 – 50,00 | 5,50 |

3.3.2. Ácido fosfónico

Tras el desarrollo del ácido arsénico como colector específico de casiterita, se inició la búsqueda de un compuesto químico que ofreciera una efectividad similar, pero con menor toxicidad. Se realizaron diversos estudios para identificar el ácido adecuado [31] [32]; en ellos se determinó que el ácido antimonioso no actuaba como un buen colector de casiterita, los ácidos alquilfosfónicos no mostraban selectividad, y el ácido etilfenileno fosfónico produjo resultados comparables o incluso superiores a los obtenidos con ácido arsénico. La fórmula estructural del ácido fosfónico se muestra en la Figura 3, la cual es similar a la del ácido arsénico, aunque en este caso el arsénico ha sido reemplazado por fósforo. Los radicales del ácido estireno fosfónico son $C_6H_5-CH-CH_2$ y del ácido p-etilfenileno son $CH_3-CH_2-C_6H_4$.

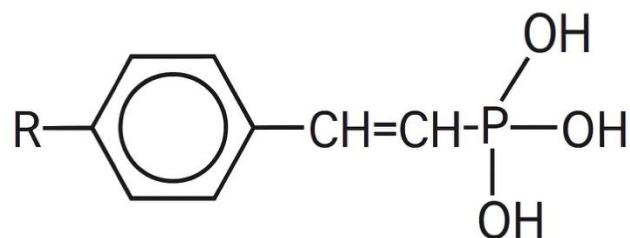


Figura 3. Fórmula estructural del ácido fosfónico

El ácido fosfónico, al igual que el arsénico, es un ácido débil dibásico en disolventes no polares; además, forma largas cadenas moleculares mediante enlaces de hidrógeno. En lo referente a la flotación de casiterita, la adsorción del ácido fosfónico sobre la superficie del mineral aumenta conforme disminuye el pH, alcanzando su máximo en pH 2.0 y reduciéndose drásticamente por debajo de este valor. El ácido fosfónico se emplea como colector cuando la presencia de cationes en la pulpa de flotación afecta negativamente la recuperación de casiterita. En particular, altas concentraciones de hierro ejercen un fuerte efecto depresor en la flotación con ácido fosfónico. La flotación de casiterita con ácido fosfónico es similar en muchos aspectos a la realizada con ácido arsénico. Para ambos colectores, el intervalo óptimo de operación en planta se considera generalmente entre pH 4.5 y 5.5. Al igual que el ácido arsénico, el ácido fosfónico también presenta la limitación de no poder recuperar eficazmente partículas de casiterita mayores de 20 μm . Cabe señalar que, para muchos minerales, el ácido fosfónico es menos selectivo que el ácido arsénico.

3.3.3. Ácidos dicarboxílicos como colectores de casiterita

En el esfuerzo por identificar nuevos colectores, en 1980 se desarrolló un nuevo colector de casiterita en la Academia de Minería de Freiberg [33]. En estos estudios se emplearon ácidos carboxílicos alifáticos, cuya estructura se muestra en la Figura 4, modificados cuidadosamente mediante la sustitución de otros grupos funcionales por grupos -COOH.

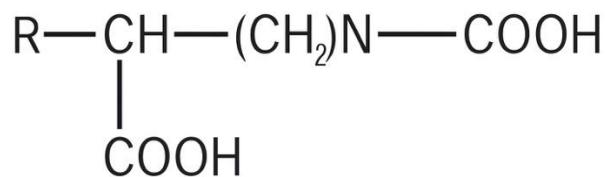


Figura 4. Fórmula general del alcano con ácido carboxílico

Aunque estos colectores resultaron efectivos para la casiterita, su selectividad frente al topacio no fue satisfactoria. Para superar este problema, se determinó que el ácido amino-naftol disulfónico actuaba como un buen depresor del topacio en presencia de ácidos carboxílicos alifáticos.

3.3.4. Hidroxamatos como colectores en la flotación de casiterita

En la literatura reciente, los hidroxamatos se reconocen como una de las familias de colectores con mayor proyección para la flotación de casiterita y otros minerales óxidos. Su interés radica en que pueden actuar como colectores “quelantes”, formando interacciones estables con sitios metálicos de la superficie mineral, lo que asocia con mayor selectividad y posibilidades de formulación frente a colectores tradicionales [34]. Estudios experimentales han mostrado que los hidroxamatos alquilo presentan buena capacidad colectora para casiterita, observándose que el aumento de la longitud de la cadena carbonada puede incrementar el poder colector [35]. Asimismo, en el caso de partículas finas, se ha investigado el uso de hidroxamatos para inducir floculación hidrofóbica, una estrategia que busca mejorar la recuperación donde la gravimetría y la flotación convencional presentan limitaciones [36]. En años recientes también se reportan hidroxamatos modificados y formulaciones con mejor desempeño (selectividad y/o menos consumo de reactivo), lo cual refuerza que esta familia constituye una línea actual de desarrollo para la flotación de óxidos de estaño [37].

3.4. Selección del depresor para la flotación de estaño

El tipo de mineral presente en la mena influye significativamente en la elección del agente de flotación de casiterita. Se han realizado numerosos estudios sobre distintos aditivos sedimentarios aplicados a menas de estaño con diferentes minerales de ganga [38] [39] [40]. A raíz de ello, diversas operaciones alrededor del mundo han comenzado a emplear una amplia variedad de estos agentes depresores. La Tabla 5 presenta los reactivos utilizados en el enriquecimiento de casiterita.

Tabla 5. Lista de depresores utilizados en el enriquecimiento de menas de casiterita

| Reactivos inorgánicos | Reactivos orgánicos |
|---------------------------|----------------------|
| Na_2SiO_3 | Ácido Oxálico |
| Na_2SiF_6 | Ácido acético |
| H_2SiF_6 | Ácido etanocarbónico |
| H_2SO_4 | Ácido tartárico |
| HCl | Ácido cítrico |
| H_3PO_4 | Cupferón |
| HF | Hematoxileno |
| NaPO_3 | Recorcinole |
| Na_2HPO_4 | Hidroquinón |
| NaF | Chininhidrocloruro |
| | Alcaloides |
| | Ácido tánico |

Un gran número de reactivos orgánicos, aunque se consideran buenos depresores para ciertos minerales de ganga, también ejercen un efecto depresor sobre la casiterita. Entre ellos se encuentran el ácido cítrico, el ácido tánico y el ácido tartárico. La Tabla 6 resume los depresores empleados para distintos minerales de ganga presentes en la mena de casiterita. Algunos minerales de ganga, como la turmalina y el topacio, suelen encontrarse asociados a los depósitos de casiterita. La separación de topacio y turmalina es particularmente problemática, ya que estos minerales no solo presentan una flotabilidad similar a la de la casiterita, sino que además se encuentran en cantidades significativas. Las menas que contienen pirofilita [41] pueden someterse a una flotación selectiva previa a la casiterita utilizando una combinación de aceite de resina (tall oil) y sulfato de alquilo. Este método se emplea en la planta de Galimovsky, en Rusia.

Tabla 7. Análisis químico de los tipos de mena de Renison

| Tipo de mineral | SB/Flt | Flt | Flt |
|---------------------------------|---------------|------------|------------|
| Muestra | 0A1 | 0A2 | 0A3 |
| %Sn | 1,49 | 2,31 | 0,65 |
| %SnS | 0,05 | 0,10 | 0,04 |
| %S | 21,00 | 15,00 | 11,00 |
| %Fe | 33,00 | 35,00 | 21,00 |
| %As | 0,60 | 2,40 | 0,95 |
| %F | 0,50 | 1,10 | 0,80 |
| %SiO ₂ | 27,00 | 5,00 | 37,00 |
| %Al ₂ O ₃ | 4,00 | 3,90 | 7,70 |
| %MnO | 0,20 | 1,60 | 0,80 |
| %TiO ₂ | 0,30 | 0,60 | 1,20 |
| %CaO | 0,90 | 1,80 | 1,90 |

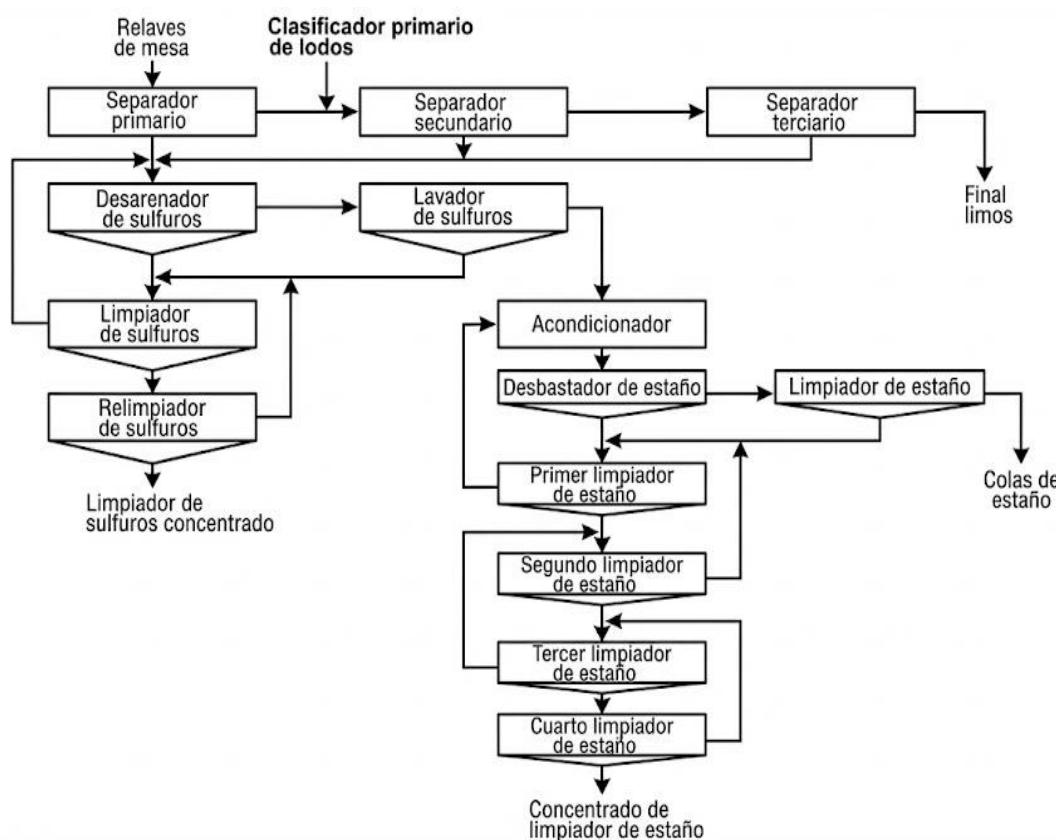


Figura 5. Fórmula general del alcano con ácido carboxílico

3.5. San Rafael, Minsur (Perú)

Con un contenido aproximado de 5% de estaño (Sn), la mina San Rafael es una de las más ricas del mundo. Originalmente fue establecida como una mina de cobre en la década de 1960, y posteriormente se descubrió la presencia de estaño. El mineral extraído contiene casiterita con tamaños de grano de hasta 8 mm. En esta mena, los principales minerales de ganga son silicatos, pirita, pirrotita, turmalina y pequeñas cantidades de cobre y plata. La operación original de San Rafael funcionaba exclusivamente mediante un circuito gravimétrico, utilizando jigs, espirales y mesas concentradoras. Aproximadamente el 80% del estaño se recuperaba por gravedad, con una recuperación promedio del 54%. Se encontró que los relaves gravimétricos provenientes de zonas cercanas a Weili contenían 1.3% de estaño (Sn), lo cual motivó estudios sobre la recuperación de estaño a partir de estos relaves a inicios de la década de 1980. En 1985 se diseñó, instaló y puso en operación una planta de flotación. La Figura 6 muestra el diagrama de bloques de la planta de flotación de San Rafael. En el separador tipo tambor Mozley, la concentración de SnO_2 en el concentrado proveniente del tercer filtro aumentó de un promedio de 36% a 54%. La Tabla 8 presenta el esquema de reactivos utilizado en esta planta. El pH fue ajustado con H_2SO_4 . En las etapas de desbaste y limpieza, la casiterita flota a valores de pH entre 5.0 y 5.5, respectivamente. Un problema operativo importante era el exceso de espuma en los circuitos de limpieza y desgasificación (R845). Este inconveniente se resolvió mediante la instalación de un acondicionador de alta intensidad en la alimentación del circuito de limpieza, el cual rompe eficientemente la espuma y permite controlarla.

Los resultados de flotación se presentan en la Tabla 9. Con una recuperación de estaño del 94.5%, el contenido final de Sn en el concentrado fue de 54%. Es importante señalar que actualmente los relaves antiguos también son recuperados y tratados mediante procesos gravimétricos y de flotación.

Tabla 8. Esquema de reactivos de la mina San Rafael – Minsur

| Reactivos | Reactivos adicionales (g/t) | | |
|-----------------------------------|-----------------------------|------------------|-----------------|
| | Círculo de sulfuros | Desbases Sn | Limpieza Sn |
| Depresores y modificadores | | | |
| Na_2SiF_6 | - | 300,00 – 500,00 | 200,00 – 300,00 |
| Na_2SiO_3 | 200,00 – 300,00 | 800,00 – 1000,00 | 250,00 – 400,00 |
| CuSO_4 | 250,00 | - | - |
| Colectores | | | |
| R 845 (Cytec) | - | 450,00 | 50,00 – 100,00 |
| Amyl Xanthato [43] | 60,00 – 80,00 | - | - |
| Ditiofosfato (R3477) | 15,00 – 20,00 | - | - |

Tabla 9. Resultados metalúrgicos de la flotación en la mina San Rafael – Minsur

| Producto | Peso (%) | Ley (%) | | % Distribución (Sn) |
|-----------------------|----------|---------|-------|---------------------|
| | | Sn | St | |
| Final tin concentrate | 2,00 | 54,40 | 0,10 | 78,20 |
| Sulfide concentrate | 9,20 | 0,30 | 40,50 | 2,00 |
| Slimes | 6,60 | 1,10 | - | 5,20 |
| Tailings | 82,20 | 0,25 | - | 14,60 |
| Feed | 100,00 | 1,39 | - | 100,00 |

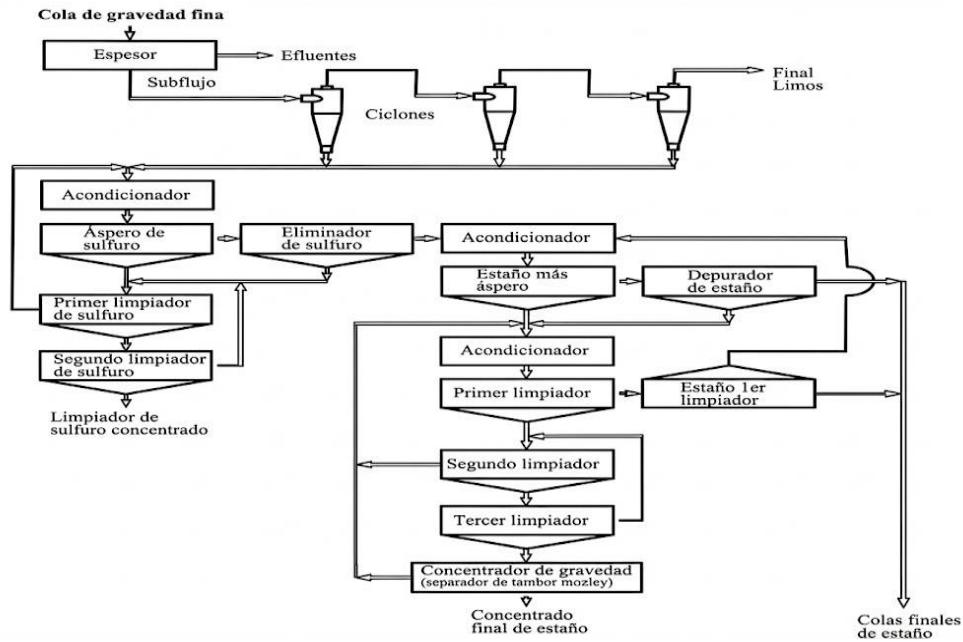


Figura 6. Diagrama de flujo de San Rafael (Perú)

3.6. Planta concentradora de Huanuni (Bolivia)

Antes del inicio de la producción moderna, la planta de Huanuni operaba principalmente con un sistema gravimétrico. Las mesas de concentración eran utilizadas para procesar partículas finas provenientes del circuito gravimétrico, las cuales contenían entre 1% y 3% de Sn. En términos generales, los minerales presentes incluyen cuarzo, silicatos y sulfuros (pirita, marcasita, pirrotita y arsenopirita), que representan entre el 40% y 50% de su composición. El principal mineral de estaño es la casiterita, acompañada por pequeñas cantidades de estannita. Los estudios de liberación del estaño muestran que una proporción significativa del metal se libera en el rango de tamaño de 300–400 micras. A tamaños de 12 μm , la liberación del estaño es solo parcial. El diagrama general del proceso de concentración por atracción se presenta en la Figura 7. Los resultados metalúrgicos finales obtenidos mediante procesos gravimétricos mostraron una recuperación promedio de Sn del 65%. Los resultados de las pruebas realizadas en el año 2000 se presentan en la Tabla 10. En estos ensayos se emplearon los depresores Na_2SiF_6 , Na_2SiO_3 y DA663 (polímero de poliacrilamida de bajo peso molecular). Los componentes del colector PL520 fueron: dialquil sulfosuccinato (R845), ésteres de ácido fosfórico (SM15) y un éster de sulfato de alcohol graso modificado en una proporción 60:20:20.

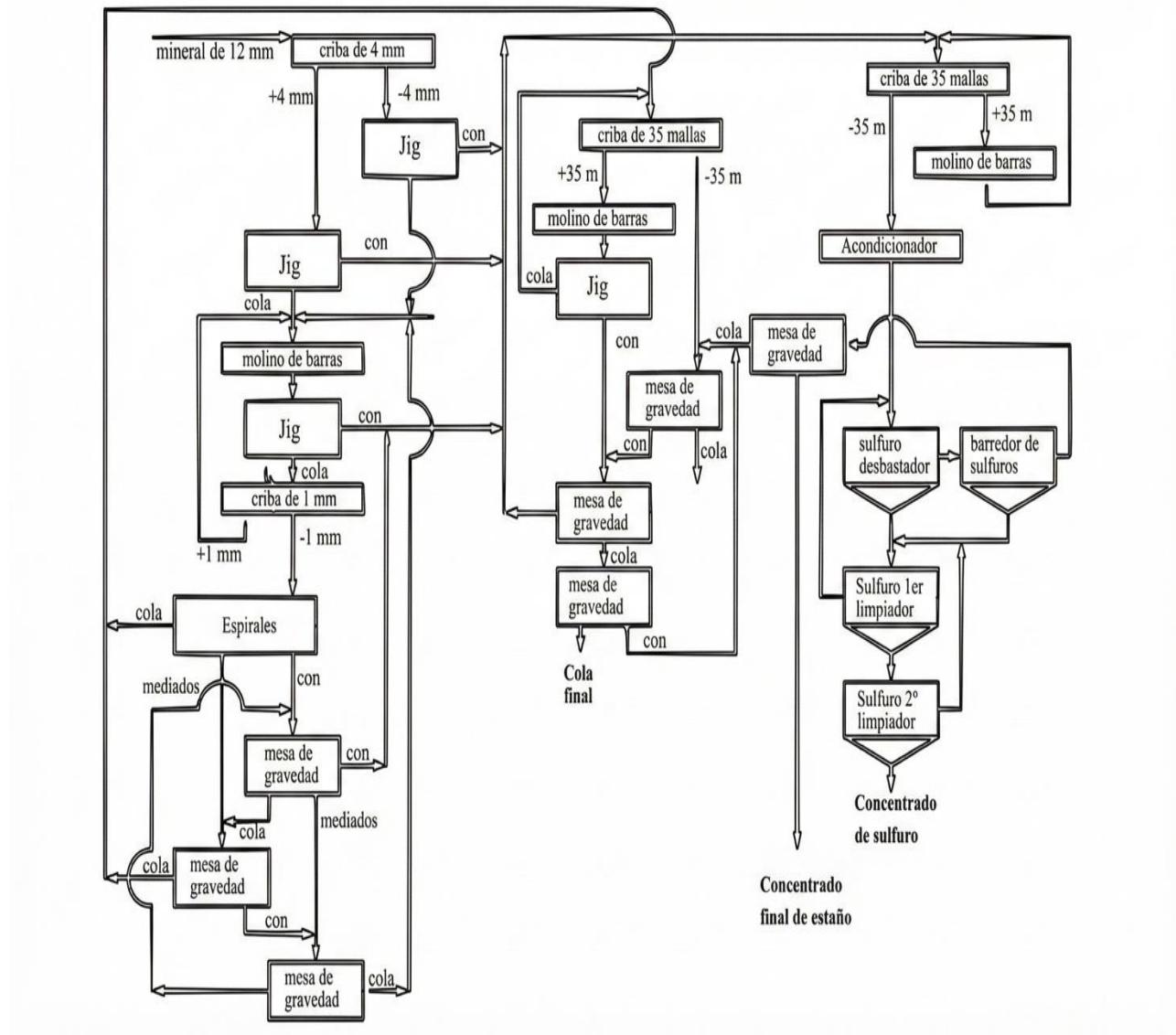


Figura 7. Diagrama general del flujo de concentración gravimétrica de la mina Huanuni.

Tabla 10. Efecto de diferentes colectores en la flotación de estaño en finos de Huanuni

| Colector | Adiciones (g/t) | Valor pH | Numero de etapas | concentración (% Sn) | Recuperación (% Sn) |
|--------------------------|-----------------|----------|------------------|----------------------|---------------------|
| Dialquilo sulfosuccinato | 350 | 35 | 3 | 12 | 65 |
| Collector PL520 | 250 | 35 | 3 | 30 | 88 |
| Collector LAC2 | 250 | 35 | 3 | 28 | 86 |
| Collector TX26 | 250 | 35 | 3 | 25 | 90 |

El colector TX26 está compuesto por dialquilo sulfosuccinato en combinación con ácido fosfórico. Este ácido fue modificado en una proporción 50:25:25 mediante la incorporación de un derivado de ácido carbónico (OMC 123).

En el caso del colector LAC2, se utiliza una solución de sulfonato oxidado en queroseno (R825) en lugar del ácido carbónico, aunque su composición es similar a la del TX26. El colector PL520 fue seleccionado debido a sus características de baja generación de espuma. Utilizando el diagrama de flujo mostrado en la Figura 8, se llevaron a cabo una serie de pruebas finales en ciclo cerrado tras la selección del colector. La Tabla 11 presenta el esquema final de reactivos empleado.

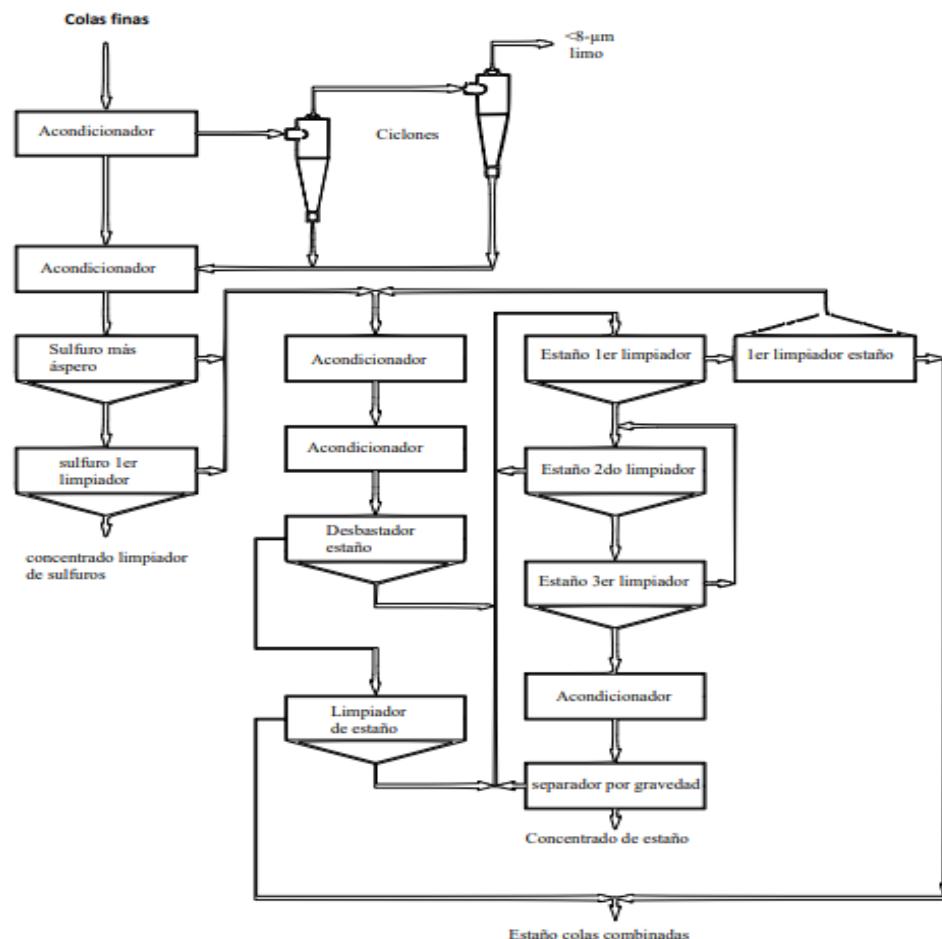


Figura 8. Diagrama de flujo final para la recuperación de estaño en finos en la concentradora de Huanuni.

Los resultados globales obtenidos en las pruebas en circuito cerrado se presentan en la Tabla 12. Con la incorporación de un circuito de flotación, la recuperación total de estaño aumentó del 65% al 87%. En el año 2005, el proyecto se encontraba en fase de estudio de factibilidad. No se tiene información sobre si la planta de flotación de Huanuni, que estaba en construcción en 2001, llegó a completarse.

Tabla 11. Esquema final de reactivos

| Reactivos | Adición de reactivos (gt) | | | |
|---|---------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| | Círculo de Sulfuros | Acondicionamiento | Desbaste de estaño | Limpieza de estaño |
| Depresores y modificadores | | | | |
| Na ₂ SiO ₃ tipo 'N' | | 500 | 600 | 400 |
| Na ₂ SiF ₆ | 4-00 | | 900 | 300 |
| H ₂ SO ₄ | | | To pH 4.5 | To pH 3.5 |
| DA666 (ácido acrílico de bajo peso molecular) | | | 150 | 100 |

| | | | |
|-----------------------------|-----|-----|----|
| CuSO ₄ | 250 | | |
| Collectors | | | |
| PL520 | | 320 | 50 |
| Amil xantate | 30 | | |
| Metal 1 isobutyl 1 carbinol | 20 | | |

Tabla 12. Efecto de diferentes colectores en la flotación de estaño en finos de Huanuni

| Producto | Peso (%) | Ley (% Sn) | % Distribución (Sn) |
|---------------------------------------|----------|------------|---------------------|
| Concentrado de flotación gravimétrica | 2.14 | 56.20 | 86.50 |
| Espumas de residuo | 85.66 | 0.16 | 9.80 |
| Concentrado de sulfuros | 4.40 | 0.30 | 0.90 |
| Lodos | 7.80 | 0.50 | 2.80 |
| Alimento | 100.00 | 1.38 | 100.00 |

3.7. Tendencias actuales en la flotación de casiterita fina: mico y nanoburbujas

En la recuperación de partículas finas de casiterita, la flotación convencional suele presentar menores eficiencias debido a la baja probabilidad de colisión y adhesión partícula-burbuja, lo que a motivado el desarrollo de estrategias de intensificación. En este contexto, una tendencia creciente es el uso de microburbujas y nanoburbujas (MNBs), las cuales pueden incrementar la frecuencia de colisión y mejorar la fijación de partículas finas, actuando las nanoburbujas como sitios de nucleación/puente que favorecen la adhesión con burbujas mayores y, por tanto, elevan la cinética de flotación [42]. La evidencia reciente en sistemas de casiterita fina reporta que la presencia de nanoburbujas puede aumentar la recuperación y la velocidad de flotación, además de permitir menores consumos de colector. En particular, se ha estudiado el mecanismo de adhesión nanoburbuja-casiterita (-10 µm) mediante técnicas como cámara de alta velocidad/AFM y pruebas de inducción observándose mejoras metalúrgicas cuando las partículas son “pretratadas” con agua que contiene nanoburbujas. Estos enfoques se han evaluado incluso en combinación con colectores de la familia de hidroxamatos, lo que refuerza su pertinencia como línea actual para la flotación de óxidos de estaño en fracciones finas [43].

4. Conclusiones

Se logró analizar e identificar los diversos minerales de estaño; aquellos con mayor valor económico son la estannita ($\text{CuS}-\text{FeS}-\text{SnS}_2$) y la casiterita (SnO_2), con contenidos de estaño de 27% y 87%, respectivamente. Otros minerales de estaño, como la colusita $\text{Cu}_3(\text{As}, \text{Sn}, \text{V}, \text{Fe}, \text{Te})\text{S}_4\text{SnS}$, que contiene entre 5% y 8% de estaño, no presentan valor económico.

Los depósitos de estaño pueden clasificarse según el grado de diseminación. El primer grupo está compuesto por depósitos diseminados, cuyos granos de casiterita varían entre 0 y 0,001 mm, lo que dificulta su recuperación. El segundo grupo corresponde a minerales de grano medio a grueso, con tamaños de casiterita entre 1 mm y 0 mm. El tercer grupo, denominado minerales de estaño de grano grueso, presenta tamaños de casiterita entre 0,1 mm y 1 mm o mayores.

En cuanto a los colectores empleados en la flotación de minerales de estaño, el ácido arsénico es uno de los reactivos utilizados; sin embargo, presenta una característica particular: reduce la movilidad de partículas mayores a 40 µm, lo que afecta la recuperación de casiterita gruesa. Por otro lado, el ácido fosfónico, aunque similar en estructura, presenta un mejor desempeño en los procesos de flotación. Asimismo, se revisaron los procedimientos de flotación aplicados en la mina Renison (Australia), donde se empleó un circuito gravimétrico que alcanzó una recuperación global de estaño del 45–50%. En la mina San

Rafael (Minsur, Perú), que también utiliza flotación de estaño, la ley de cabeza es aproximadamente 5% Sn. En dicho proceso metalúrgico se utilizan dos tipos de reactivos: depresores y colectores, entre los cuales destacan el CuSO₄ y el xantato de amilo. Finalmente, se recomienda que futuros trabajos complementen la revisión de la flotación de casiterita considerando la presencia de subproductos y minerales estratégicos asociados según el tipo de depósito, tales como minerales portadores de tantalio y niobio (Ta–Nb) y tungsteno (W), además de sulfuros acompañantes que pueden actuar como impurezas o aportar valor económico. En ese sentido, es importante evaluar la viabilidad metalúrgica y económica de su recuperación como subproductos, así como su impacto en la calidad del concentrado de estaño (contaminaciones y posibles penalidades). Asimismo, se recomienda profundizar en el estudio de alternativas actuales orientadas a mejorar la recuperación de casiterita fina, incorporando colectores modernos de la familia de los hidroxamatos y tecnologías de intensificación como micro y nanoburbujas, integrándolas dentro del esquema industrial gravimetría, flotación aplicado a colas y fracciones finas. Finalmente, se sugiere que estas evaluaciones se apoyen en caracterización mineralógica (asociación, liberación y distribución granulométrica) para definir rutas de proceso específicas para cada tipo de mena.

5. Conflicto de Intereses

El autor declara que no tienen conflictos de interés.

6. Referencias

- [1] Angadi SI, Sreenivas T, Ho-Seok Jeon, Sang-Ho Baek, Mishra BK. A review of cassiterite beneficiation fundamentals and plant practices. *Minerals Engineering*. 2015 January; 70: 178–200.
- [2] Philippe LVS, Lyon SB, Sammon C, Yarwood J. Validation of electrochemical impedance measurements for water sorption into epoxy coatings using gravimetry and infra-red spectroscopy. *Corrosion Science*. 2008 March; 50(3): 887–896.
- [3] Chander S. A brief review of pulp potentials in sulfide flotation. *International Journal of Mineral Processing*. 2003 September 29; 72(1–4): 141–150.
- [4] Williams EF, Woodberry NT, Dixon JK. Purification and surface tension properties of alkyl sodium sulfosuccinates. *Journal of Colloid Science*. 1957 October; 12(5): 452–459.
- [5] Charlotte M, Berchel M, Couthon H, Jaffrés P. Phosphonic acid: preparation and applications. *Journal of Organic Chemistry*. 2017; 13: 2186–2213.
- [6] Chai L, Yue M, Yang J, Wang Q, Li Q, Liu H. Formation of tooeleite and the role of direct removal of As(III) from high-arsenic acid wastewater. *Journal of Hazardous Materials*. 2016 December 15; 320: 620–627.
- [7] Pryor EJ, Vrobel SA. Studies in Cassiterite Flotation. *Bulletin of the Institution of Mining and Metallurgy*. 1951; 532: 201.
- [8] Pijarino F. *Hydrothermal Mineral Deposits*. Springer-Verlag; 2008.
- [9] Sibson R, Rober F, Poulsen H. High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits. 1988 June 01; 16(6).
- [10] Simon A, Ripley E. The Role of Magmatic Sulfur in the Formation of Ore Deposits. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2011 January 11.
- [11] Mitchell Anh K, Nguyen V. Heterocoagulation of chalcopyrite and pyrite minerals in flotation separation. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2005 June 30; 227–237.
- [12] Miller AJD, Li C, Davidtz F, Vosb. A review of pyrrhotite flotation chemistry in the processing of PGM ores. *Minerals Engineering*. 2005 July 8; 18(8): 855–865.
- [13] McKibben MA, Tallant JA, del Angel K. Kinetics of inorganic arsenopyrite oxidation in acidic aqueous solutions. *Applied Geochemistry*. 2008 February 28; 23(2): 121–135.
- [14] Ran Ang D, Khan U, Tsujii N, Takai K, Nakamura R, Mori T. Thermoelectricity generation and electron-magnon scattering in a natural chalcopyrite mineral from a deep-sea hydrothermal vent. *Angewandte Chemie*. 2015; 127(44).

- [15] Lei X, Wang J, Shi C, Huang J, Zhang H, Liu Q, et al. Probing surface interactions of electrochemically active galena mineral surface using atomic force microscopy. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2016; 22433–22442.
- [16] Dingwell D. Shear viscosities of ferrosilicate liquids. *American Mineralogist*. 1989; 1038–1044.
- [17] Hawthorne FC, Henry DJ. Classification of the minerals of the tourmaline group. *European Journal of Mineralogy*. 1999; 201–215.
- [18] Polkin SI. *Flotation of Rare Metal and Tin Ores*. Gosgorte-khizdat; 1971.
- [19] Krasnukhina AV, Lepetov SF, Vakhromova SP. Concentration of Tin Ores. Report of Scientific Research Institute on Tin; 1971.
- [20] Streltsin VG, Ponovich MN. Proceedings of Symposium on Flotation of Cassiterite. Novosibirsk; 1973.
- [21] Bulatovic SM. New Collector Mixture for Tin Flotation – The Recovery of Tin from San Rafael Gravity Tailings. Report of Investigation; 2005.
- [22] Zhu J, Zhu Y. The effect of ions in water on the benzyl arsonic acid flotation of cassiterite slimes. *Journal of Central-South Institute of Mining and Metallurgy*. 1985; 1(1): 29–37.
- [23] He JZ, Liu MX. Innovation in separation technology for fine gravity semi-products. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 1984; 553–562.
- [24] Cuyper J, Sales A. Flotation of cassiterite. *Proceedings of International Tin Symposium*. 1977; 175–182.
- [25] Kirchberg H, Wottgen L. The effect of phosphorus and antimony surfactants on cassiterite flotation. *Chemistry, Physics and Application of Surface Active Substances*. 1976; 693–704.
- [26] Arbiter N. Beneficiation of cassiterite ore by froth flotation. *British Patent*. 1968; 110–643.
- [27] Polkin SJ, Korzova RV. The flotation of cassiterite and tourmaline by means of DNS and high molecular tannins. *Tsvetnie Metally*. 13(10): 10–13.
- [28] Strebzyn VG. Selective flotation of cassiterite in the presence of iron-bearing minerals. *Obogasthenie Rud*. 1968; (13): 3–6.
- [29] Topfer G, Gruner U, Menzer D. The behaviour of gangue minerals in the flotation of cassiterite. *Symposium for Tin Beneficiation*. 1971; 277–280.
- [30] Ali M, Ahmed H, Ahmed H, Hefni M. Pyrophyllite: An economic mineral for different industrial applications. *Applied Sciences*. 2021.
- [31] Bru K, Machado M. Pilot-scale investigation of two electric pulse fragmentation (EPF) approaches for the mineral processing of a low-grade cassiterite schist ore. *Minerals Engineering*. 2020 May 1; 150.
- [32] Kovalenker V. Kuramite, Cu₃SnS₄, a new mineral of the stannite group. *International Geology Review*. 2010; 365–370.
- [33] Robert E, Landon, Mogilnor A. Colusite, a new mineral of the sphalerite group. *American Mineralogist*. 1933; 528–533.
- [34] Wang X, Li H, Liu X, Tang Y, Ni C. Advances in flotation reagents for cassiterite separation: challenges and sustainable solutions. *Molecules*. 2025; 30(11): 2380.
- [35] Jin S, Zhang P, Ou L, Zhang Y, Chen J. Flotation of cassiterite using alkyl hydroxamates with different carbon chain lengths: a theoretical and experimental study. *Minerals Engineering*. 2021; 170.
- [36] Jin S, Shi Q, Ou L. Hydrophobic flocculation of fine cassiterite using alkyl hydroxamic acids with different carbon chain lengths as collectors. *Molecules*. 2023; 28(9): 3911.
- [37] Zhao G, Zhou X, Li F, Fu G, Shang X. Flotation performance of anisic hydroxamic acid as new collector for tungsten and tin minerals. *Journal of Central South University*. 2022; 29(11): 3645–3655.
- [38] Luke L, Chang, Brice W. The herzenbergite-teallite series. *Mineralogical Magazine*. 2013; 186–189.
- [39] Zhai D, Bindi L, Panagiotis L, Jiajun S, Tombros, Li K. Discovery of Se-rich canfieldite, Ag₈Sn(S,Se)₆, from the Shuangjianzishan Ag-Pb-Zn deposit, NE China. *Mineralogical Magazine*. 2019; 83(3): 419–426.
- [40] Jaszcak A, Rumsey S, Bindi S, Hackney M, Wise C, Stanley, et al. Merelaniite: a new molybdenum-essential member of the cylindrite group from the Merelani Tanzanite Deposit, Tanzania. *Minerals*. 2016; 6(4).
- [41] Casati P, Nicoletti M, Petrucciani C. Eta (K/AR) di intrusioni profiritiche e leucogabbriche nelle prealpi bergamasche. *Pascal Francis*. 1976; 32(1): 215–226.
- [42] Han G, Chen S, Su S, Huang Y, Liu B, Sun H. A review and perspective on micro and nanobubbles: what they are and why they matter. *Minerals Engineering*. 2022; 189.
- [43] Ren L, Zhang Z, Zeng W, Zhang Y. Adhesion between nanobubbles and fine cassiterite particles. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2023; 33(4): 503–509.

