



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

TRATAMIENTO DE MENAS AURIFERAS ASOCIADAS A MINERALES DE ARSENICO

Fernanda Karina Enderica Ortega

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales
Medellín, Colombia
2023

TRATAMIENTO DE MENAS AURIFERAS ASOCIADAS A MINERALES DE ARSENICO

Fernanda Karina Enderica Ortega

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título
de:

Magister en Ingeniería – Recursos minerales

Director (a):

Ph.D., Moisés Oswaldo Bustamante Rúa

Línea de Investigación:

Metalurgia Extractiva

Grupo de Investigación:

Instituto de minerales CIMEX

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales

Medellín, Colombia

2023

A mis padres Soledad y Hernán, pilares de mi vida que me sostiene e impulsan a ser mejor mujer y profesional día a día.

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Fernanda Karina Enderica Ortega

Nombre

31/01/2023

Fecha

Agradecimientos

A Dios, que mediante las oraciones de mi madre me actúa y me guía por el camino correcto, permitiéndome culminar cada una de las etapas que me propongo.

A mi padre que con su ejemplo de fortaleza me impulso a no desistir en ningún momento de la vida; así también al amor de mis hermanas que en la distancia siempre me sentí acompañada.

A mis amigas, Tania Garzón y Jessica Cardozo por su apoyo incondicional, risas, tiempo de estudio y lo que implica la vida juntas.

A mi profesor Oswaldo Bustamante, que me extendió su mano para así convertirse en una persona excepcional dentro de mi proceso de aprendizaje; quien me enseñó a ser persistente y audaz, a tener metas altas y un pensamiento amplio.

Resumen

Tratamiento de menas auríferas asociadas a minerales de arsénico

Este trabajo presenta los resultados de una investigación bibliográfica y el análisis posterior de la extracción metalúrgica de oro a partir de menas asociadas a minerales de arsénico. Se detalla las características químico-mineralógicas de estas menas y los tratamientos metalúrgicos posibles para mejorar las condiciones de extracción en presencia de minerales de arsénico que presenta relativa capacidad de acomplejamiento bajo las condiciones físico-químicas del acomplejamiento del oro en medio cianuro.

Se concluye que existen alternativas mineralúrgicas, asociadas a características mineralógicas de las menas y este asunto aún no está clausurado definitivamente, lo cual implica un reto de investigación para la explotación de depósitos auríferos asociados a minerales de arsénico.

Palabras clave: Arsénico, Mineral aurífero, tratamiento, procesos metalúrgicos.

Abstract

Treatment of auriferous ores associated with arsenic ores.

This paper presents the results of a bibliographic investigation and the subsequent analysis of the metallurgical extraction of gold from ores associated with arsenic minerals. It details the chemical-mineralogical characteristics of these ores and the possible metallurgical treatments to improve the extraction conditions in the presence of arsenic minerals that have a relative capacity for complexing under the physico-chemical conditions of gold complexing in cyanide.

It is concluded that there are mineralurgical alternatives, associated with mineralogical characteristics of the ores and this issue is not yet definitively closed, which implies a research challenge for the exploitation of gold deposits associated with arsenic ores.

Keywords: Arsenic, Auriferous ore, treatment, metallurgical processes.

Contenido

	Pág.
Lista de figuras.....	XXIII
Lista de tablas	XXIV
Introducción	1
1. Estado del arte.....	3
1.1 Oro: Características, propiedades y sus condiciones	3
1.1.1 Propiedades físicas del oro.....	4
1.1.2 Propiedades químicas del oro.....	5
1.1.3 Mineralogía del oro	6
1.2 Arsénico: Características, propiedades y sus condiciones	9
1.2.1 Propiedades físicas del arsénico	9
1.2.2 Propiedades químicas del arsénico	9
1.2.3 Características químico - mineralógicas de menas auríferas asociadas a minerales de arsénico.	10
2. Escenario que afecta la recuperación de oro en presencia de arsénico.....	12
2.1 Refractariedad de mena aurífera.....	14
2.2 Arsenopirita (FeAsS).....	16
2.2.1 Mecanismo de reacción de la arsenopirita.....	17
3. Pretratamientos para minerales auríferos con refractariedad	19
3.1.1 Oxidación con permanganato de potasio	19
3.1.2 Oxidación biológica.....	19
3.1.3 Oxidación a presiones altas	20
3.1.4 Molienda ultrafina	20
3.1.5 Tostación.....	21
4. Tratamientos de menas auríferas.....	25
4.1 Procesos metalúrgicos para tratar minerales auríferos.....	25
4.1.1 Caracterización de mineralogía.....	28
4.2 Flotación	28
4.2.1.1 Tipos de Flotación	29
4.3 Cianuración.....	31
4.4 Análisis de reacción del sistema heterogéneo mineral de arsénico	32
5. Conclusiones y recomendaciones.....	35
5.1 Conclusiones.....	35
5.2 Recomendaciones.....	37

Bibliografía 41

Lista de figuras

	Pág.
FIGURA 1.- CLASIFICACIÓN DE REFRACTARIEDAD DE MENAS DE ORO.	15
FIGURA 2.- BIOTECNOLOGÍA MICROBIANA APLICADA A LA MINERÍA.....	20
FIGURA 3.- PROCESO DE OXIDACIÓN EN PARTÍCULA.....	22
FIGURA 4.- TRATAMIENTO DE MENAS AURÍFERAS ASOCIADAS A MINERALES DE ARSÉNICO	26
FIGURA 5.- DIFERENCIAS ENTRE LAS PROPIEDADES DEL MINERAL ÚTIL Y LA GANGA	29
FIGURA 6.- CELDA DENVER CON SUS RESPECTIVAS PARTES	30
FIGURA 7.- FORMAS ALOTRÓPICAS DEL AS Y SUS ESTRUCTURAS: DE IZQUIERDA A DERECHA: GRIS, AMARILLO Y NEGRO.....	33
FIGURA 8.- PROPUESTA DE TRATAMIENTO PARA RECUPERACIÓN DE AU.....	36

Lista de tablas

	Pág.
TABLA 1.1.- PROPIEDADES FÍSICAS DE ORO	5
TABLA 1.2.- PROPIEDADES QUÍMICAS DEL ORO.	6
TABLA 1.3.- CLASIFICACIÓN DE MENAS DE ORO	7
TABLA 2.1.- PRINCIPALES MINERALES DE ORO Y PORTADORES DE ORO	13
TABLA 3.1.- PROCESOS METALÚRGICOS PARA TRATAR MINERALES AURÍFEROS COMPLEJOS	27

Introducción

El oro, un mineral importante como necesario para el desarrollo y la economía de la sociedad, el cual tiene una historia a lo largo de cada generación, conlleva nuevos objetivos como retos. Las menas de oro, que son estudiadas y perseguidas por los hombres, han tomado unas nuevas características, en muchos casos se dificulta la obtención del mineral de gran interés alrededor del mundo.

Los minerales auríferos gracias a la extracción de oro y en los diferentes depósitos minerales han sido foco de estudios, en el transcurso de los años han surgido gran cantidad de investigaciones, dado a las diferentes necesidades y propiedades que se evidencian en cada zona de análisis, llegando a nuevos términos como la refractariedad haciendo referencia a los minerales que están presentes pero que impiden la efectiva recuperación de oro en los procesos metalúrgicos. (Barriga Vilca, 2019)

A raíz de las nuevas investigaciones y experimentación en las plantas de beneficio mineral, tanto en laboratorio como a escala industrial, se ha observado diferentes tratamientos propuestos para minerales con gran contenido de sulfuros, siendo este el motivo por el cual se propone analizar dichos tratamientos y pretratamientos propuestos, pero dando un énfasis en las menas auríferas asociado a minerales arsénico.

Encontrando así diferentes propuestas como la implementación de flotación de minerales con posibles reactivos que incrementan la concentración, pre-tratamientos en búsqueda de la oxidación acelerada del arsénico, como también oxigenación en medio de las cianuraciones (Santos Madrid, 2020); al evaluarse dan como resultado una nueva posible alternativa de solución, por medio de tratamientos completos que implican más de un proceso, se han demostrado cifras de incrementos de recuperación de oro, como mejora en los índices metalúrgicos, lo cual conlleva beneficios económicos como cinéticos en las plantas de beneficio mineral.

Los tratamientos como la cianuración convencional se han mostrado lo poco viables para la recuperación de oro dado al gran consumo de reactivos en el proceso (Ferrer & Helaman , 2019); se analizan con ayuda de la flotación que permite la concentración y liberación de oro de la matriz.

Además, pretratamientos con nuevas tecnologías (Valencia Giraldo , 2013) que buscan implementar la oxidación por medio de oxigenación, temperatura, presión o bacterias (Saavedra & Cortón, 2014). También moliendas finas que llegan a tamaños de partículas que permiten la liberación del oro previamente a la concentración, esto permite que los nuevos procesos no sean unitarios, sino que se complementen unos con otros logrando soluciones viables tanto en la recuperación de oro como en el enriquecimiento de este. (Santos Madrid, 2020)

Implementando áreas de conocimiento como la mineralurgia y metalurgia extractiva con sus conceptos teóricos-prácticos, se analizan diferentes situaciones y artículos que presentan procedimientos, evaluaciones o experimentación con resultados a minerales con presencia de arsénico o minerales refractarios que permiten una posible visión y planteamiento de soluciones para las menas auríferas con características similares.

Concluyendo así una investigación teórica con énfasis en menas de mineral aurífero teniendo un panorama más amplio y puntual, permitiendo que sea una guía para el tratamiento de minerales con presencia de arsénico y lo que ello implica si así se decide.

1. Estado del arte

1.1 Oro: Características, propiedades y sus condiciones

El oro y sus compuestos también han provocado el interés de los físicos y químicos dando lugar a la fase teórico-práctica, pues el oro como elemento químico sirve como único punto de referencia para nuevos estudios, dando lugar a investigaciones que tienen como objetivo y se enfocan en el análisis de la implementación tecnología entre 1 a 10 nanómetros y a nivel molecular. (Valencia Giraldo , 2013)

La relación con los complejos de oro, por medio de enlaces secundarios lleva a patrones con interesantes estructuras dando lugar a fuertes enlaces donde el oro se asocia a nuevos elementos en la estructura interna. Por lo tanto, esto puede tener características comunes y a su vez generar dificultades al momento de separar y/o romper estos enlaces pues se encuentran en un equilibrio del nuevo sistema cristalino formado. (Valencia Giraldo , 2013)

El oro es un elemento químico con bastante extensión en la corteza terrestre, pero con tenores muy bajos, alrededor de 4 mg/t (0,004 gramos en una tonelada de roca). Comparando su contenido con otro elemento como el cobre, podemos ver que este presenta contenidos medios 23.000 veces superiores al oro o, lo que es una media de 47 gramos en una tonelada de roca. Esta proporción no se mantiene con su valor monetario, ya que el del oro es solo 3.200 veces más elevado que el del cobre. (Villadevall Solé, 2016)

Entendiendo y analizando las propiedades físicas como químicas del oro; permiten realizar diferentes aleaciones, procesos e investigaciones generando nuevas propuestas como soluciones a problemáticas de la actualidad; como la presente investigación relacionada al mineral de arsénico en menas auríferas permitiendo evaluar propiedades que se pueden destacar y proponer tratamientos para mejorar la recuperación de oro.

1.1.1 Propiedades físicas del oro

El oro es un elemento que en la naturaleza se puede encontrar de manera nativa cuyas características que se destacan entre todos los metales es que es el más maleable y dúctil, también se caracteriza por lo blando permitiendo ser usado en joyería y para acuñar monedas, por lo que se hacen aleaciones con la plata o cobre. Su dureza está evaluada en 3 en la escala de Mohs y la gravedad específica es 19,3, tiene una densidad de 19,42 g/mL, su punto de fusión es 1336 °K, el punto de ebullición es 3243 °K y se cristaliza en sistema cúbico. También cuenta con características como su conductividad térmica de 103 según Despretz, 98 según Calvet y Johnson y 60 según Wiedeman y Franz, su conductividad eléctrica es 73 a 567,95 °K (Matthiesen) en comparación con la plata que tiene un valor de 100 a la temperatura de 273 °K. (Romero Aliaga, 2018)

El oro se vuelve menos denso a medida que contiene mayor proporción de plata, la ductilidad se disminuye significativamente por la presencia de pequeñas cantidades de otras impurezas especialmente de plomo. En presencia de metales extraños y al incrementar la temperatura se volatiliza como vapor rojizo hasta alcanzar los 2873 °K y su calor específico esta entre 0,0298 (Dulong y Petit y 0,03244 Regnaut).

En la tabla 1.1 se tienen las propiedades físicas con sus respectiva descripción y valores, unificando la información para posterior comparativo.

Tabla 1.1.- Propiedades físicas de oro

Propiedades Físicas	Valores
Tenacidad	Muy maleable y ductil
Brillo	Metálico amarillo
Color de la raya	Amarillo brillante
Punto de fusión	1336 °K
Punto de ebullición	3243 °K
Peso atómico	197,2
N° atómico	79
Densidad	19,3 g/mL
Conductividad térmica	103 cal/cm.s. °C
Cristales	Sistema Cúbico

Fuente: Ballester, Vedeja & Sanchoo, 2000

1.1.2 Propiedades químicas del oro

El oro es el elemento con símbolo Au, número atómico es 79, el peso atómico es 197,2, ubicado en la tabla periódica como un metal permitiendo fácilmente aleaciones con metales de su mismo grupo, principalmente como la plata y el cobre. Le es fácil realizar enlaces con otros minerales los cuales tienen enlaces simples en su estructura interna, relacionándose con minerales que contienen Arsénico, (As), Hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), plomo (Pb), níquel (Ni).

El oro no se oxida a la temperatura ordinaria lo que le permite mantener su estructura y sus enlaces en minerales a diferencia de minerales que por su alta oxidación pueden cambiar su composición química. (Romero Aliaga, 2018)

El oro es fácilmente soluble en agua regia, que produce cloro nascente. (Romero Aliaga, 2018). Se disuelve en una mezcla de ácido nítrico y clorhídrico concentrado (agua regia) con proporciones de 1:1 ó 3:1 y en algunos casos ácido selénico, también en soluciones de ácido sulfúrico que contienen cloruros y bióxido de manganeso y en tiosulfatos de sodio, potasio, calcio y magnesio. Este metal se puede disolver en ácido clorhídrico en presencia de sustancias orgánicas, en cloruros férricos u cúpricos, además es algo soluble en una solución de carbonato de sodio al 10 % y en soluciones cianuradas.

Las soluciones que llevan oro al estado de cloruro atacan a los carbonatos, calcosina y muchos otros minerales que reducen la acidez y decantándose, el oro es generalmente depositado como oro amarillo de gran pureza. (Romero Aliaga, 2018)

Tabla 1.2.- Propiedades químicas del oro.

Propiedades Químicas	Valores
Posición	Grupo IB del sistema periódico
Configuración electrónica	$4f^{14}5d^{10}6s^1$
Valencias	+1, +3
Potencial normal de reducción	a 25 °C es 1,50 V
Enlace	siempre covalente
No reacciona	O_2 , As, H_2SO_4 , HF, HNO_3 (excepto altas concentraciones)

Fuente: Ballester, Verdeja & Sancho, 2000

1.1.3 Mineralogía del oro

El oro al ser un elemento con diferentes características se puede encontrar con diferente mineralogía de forma nativa o junto con otros minerales. Principalmente la mena más común se da en vetas o también llamados filones hidrotermales, con relación de mineral estéril como el cuarzo, también asociaciones de piritita y otros sulfuros como es el caso de estudio con el arsénico, depositándose en lugares de fallamiento o conjunto de diaclasa permitiendo convertirse en lugares estratégicos de este tipo de depósito. Las menas se pueden clasificar dependiendo de la aleación que tiene el oro con otros elementos. (Ballester , Verdeja, & Sancho , 2000)

- **Oro libre:** Se encuentra en su estado nativo sin ninguna asociación con ningún otro metal predominante, por lo cual admite su recuperación por métodos gravitacionales directamente, amalgamación o cianuración directa, predominan en depósitos aluviales.
- **Oro asociado a sulfuros de hierro:** Este caso se da cuando el oro se encuentra diseminado bajo la forma de finas partículas, granos de la piritita u otros sulfuros como pirrotina y/o marmatita, por lo cual se requiere una concentración y posterior acomplejamiento con cianuro.

En algunas ocasiones cuando el oro esta ocluido en granos de sulfuros como pirita se sugiere calcinación a muerte, o seguida de una cianuración.

- **Oro asociado a minerales de arsénico o de antimonio:** Por la estructura y enlaces que se generan con estos metaloides cuando se encuentran asociados a menas auríferas, hacen aún más difícil el tratamiento para la extracción, y el proceso de concentración, calcinación y cianuración, puede tener rendimiento de extracción demasiado bajos.
- **Oro asociado a minerales de cobre, plomo y zinc:** Algunos minerales de cobre, extraídos a gran escala, generan recuperaciones importantes de oro. El oro sigue al cobre hasta su afino electrolítico, en donde es recuperado en los lodos electrolíticos, se destaca la calcopirita ($CuFeS_2$) la cual relaciona el cobre con el oro.
- **Oro en menas refractarias:** Se le denomina mineral refractario, cuando no se logra obtener altos porcentajes de extracción por métodos convencionales de extracción metalúrgica de oro. Las anteriores descripciones podrían considerarse menas refractarias, cuando el enlace que se realiza con otros elementos dificulta la obtención de buenos tenores.

Tabla 1.3.- Clasificación de menas de oro

Tipo de mineral	Tratamiento
1.- Oro libre	Concentración gravimétrica, cianuración.
2.-Oro con sulfuros	Flotación, reacción con cal, tostación, calcinación y cianuración.
3.-Oro con minerales de arsénico y antimonio	Flotación, tostación, lixiviación y cianuración.
4.-Oro en telururos	Flotación, tostación y oxidación química, y cianuración.
5.-Oro en pórfidos de cobre	Fusión para el cobre, oro en barras anódicas
6.-Oro con minerales de plomo y cinc	Flotación en escorias o residuos de la electrolisis del conc, Cianuración de residuos de flotación.
7.-Minerales carbonáceos	Oxidación, flotación, tratamiento superficial antes de la cianuración.

Fuente: Linge, 1994

En la tabla 1.3 se puede observar según el tipo de mineral un posible tratamiento para aumentar el tenor en la extracción de oro.

En este trabajo se analiza cómo se relaciona el oro con arsénico con un posible tratamiento como una flotación, tostación, lixiviación y cianuración. (Gutierrez Falcón, 2017). Evaluando cómo estas metodologías logran mejorar la obtención de oro, pues durante el transcurso de los años sigue el registro del mineral de interés en la ganga, sin lograr una mejora significativa en los procesos mencionados con respecto a recuperación de oro.

Ahora bien, en los depósitos auríferos con presencia de arsénico se encuentran minerales como la arsenopirita, oropimente, rejalgar, arsenolita, que afectan los procesos de concentración de oro, afectando la flotación y la cianuración específicamente hacen que estos consuman reactivos en tiempos cortos, afectando la efectividad y el rendimiento de los procesos. (David, 2017). Como se pudo evidenciar en ensayos de laboratorio donde se buscó entender y analizar los efectos de estos elementos los enlaces entre el arsénico (As) adicionando más iones únicos de este elemento en las cianuraciones evaluando su cinética, dando como resultados pocas mejoras pues al incrementar estos iones de manera elemental se genera una superficie recubriendo el que impide la recuperación efectiva.

1.2 Arsénico: Características, propiedades y sus condiciones

Se es necesario entender las propiedades del arsénico, para entender la relación en las menas auríferas y posibles tratamientos.

Este elemento se encuentra distribuido grandemente alrededor de la tierra, es un elemento y en gran conjunto forma un mineral. Es resistente a los cambios de erosión en la corteza manteniendo su estructura, pero permite la unión con otros minerales para formar compuestos, muy utilizados en la industria. (Henaó Vásquez, 2014)

1.2.1 Propiedades físicas del arsénico

El arsénico se caracteriza por tener una dureza alta de 5 ½ a 6 en la escala de Mohs, su G son 6,07, es de color gris con un brillo metálico, su raya es brillante, además es propenso a tener pátina amarillenta a pardusca lo cual presenta semejanza con sulfuros como piritita, marcasita y pirrotina.

Presenta tres estados alotrópicos, el gris, amarillo y negro. En estas tres fases conduce electricidad, calor y forma gases al evaporarse. Varía por los compuestos que forma, según sean orgánicos, el más tóxico, inorgánicos y gas. Su reactividad: Muy violenta, más que todos con halógenos y oxidantes fuertes, hasta el punto de causar incendios. (Henaó Vásquez, 2014)

- Estructura: Varía en función de su forma alotrópica. La gris y amarilla son romboédricas y el negro es hexagonal.
- Solubilidad: El Arsénico en el agua es insoluble, pero se disuelve con facilidad en ácidos fuertes.
- Densidad 5,72 Kg/m³, punto de ebullición de 613°C, punto de fusión 817°C, Calor específico 330 J/(K Kg), conductividad térmica 50 W/Km

1.2.2 Propiedades químicas del arsénico

Al estar ubicado en el grupo en transición entre elementos de los metales y no metales en la tabla periódica se denomina metaloide. Su símbolo es As, número atómico 33 y masa atómica 74,922u.

1.2.3 Características químico - mineralógicas de menas auríferas asociadas a minerales de arsénico.

El arsénico se presenta principalmente entre los sulfuros como mineral en forma maclado, diseminada y/o agregados granulares es la arsenopirita ($FeAsS$), ya que que estos elementos realizan enlaces en la fase micro dispersa de cobalto y oro, los cuales se pueden ver en minerales como con cobalto la cobaltita ($CoAsS$), esmaltita ($CoAs_2$) o con níquel como la gersdorffita ($NiAsS$). Además, se encuentran en depósitos hidrotermales, a altas temperaturas, asociados frecuentemente a Pirita, Galena, Calcopirita, Oro, y ganga como cuarzo, siendo uno de los minerales con más alta pureza al 99.9 %. (Gasque Silva, 2013)

Comercialmente, el As elemental se obtiene como subproducto del tratamiento de otros minerales metálicos como el oro, la plata y el cobre, o por calentamiento de la arsenopirita ($FeAsS$), en el que se produce As en estado puro. En la naturaleza, el As se encuentra como constituyente de una gran variedad de minerales usualmente combinado con minerales sulfurados como el oropimente (As_2S_3) y el rejalgar (AsS). Éstos han sido usados desde hace siglos como cosméticos debido a la coloración amarilla del oropimente y anaranjada del rejalgar. También se emplean alecciones de arsénico con plomo, para obtener arsénico blanco u óxido de arsénico, para aplicaciones en la medicina, insecticidas, pigmentos, fabricación de vidrio y juegos artificiales. (Henaó Vásquez, 2014)

El óxido arsenolita, (As_4O_3), se encuentra como producto de la alteración debida a los agentes atmosféricos de otros minerales de arsénico, se recupera de los polvos colectados de los conductos durante la extracción de Ni, Cu y Sn; igualmente se obtiene al calcinar los arseniuros de Fe, Co o Ni en el oxígeno (WHO, 1981).

El elemento puede obtenerse por calcinación de ($FeAsS$) o ($5FeAs_2$) en ausencia de aire o por reducción de (As_4O_3) con carbonato, cuando se sublima (As_4).

En Colombia se ha estudiado ocurrencia de mena de arsenopirita como en regiones del Chocó, Caldas, Buenos aires-Cauca, Anorí-Antioquia. (Henaó Vásquez, 2014)

2. Escenario que afecta la recuperación de oro en presencia de arsénico

La relación que se lleva comúnmente entre el oro y el arsénico en la mayoría de los escenarios donde se extrae oro en depósitos de minerales refractarios se ven afectados debido a la mineralogía que se encuentra en la zona, provocando una disminución en la recuperación del mineral de interés y el procesamiento en planta que debe tener. (Romero Aliaga, 2018)

Se tienen cuatro parámetros que pueden indicar la dificultad de recuperar oro en la zona y conocer la mineralogía ayuda a dar solución al procesamiento del mineral. (Zhou, 2012):

- El tipo del mineral aurífero.
- El tamaño de partícula que posee.
- Los minerales con los que se encuentra asociado.
- La distribución en el mineral que lo contiene.

Nos permite predecir:

- La respuesta del oro a diferentes procesos.
- Oro libre o refractario
- Factor mineral que afecte el procesamiento de oro

Dando solución a problemas de procesamiento:

- Comportamiento de oro perdido.
- Causas de pérdida de oro y otras pérdidas valorables.
- Como mejorar recuperación.

De acuerdo con (Zhou, 2012), la naturaleza del oro y sus portadores se dividen en oro microscópico el cual es visible, oro submicroscópico o invisible y oro ligado a superficies el cual es absorbido en la estructura de otros minerales.

La Tabla 2.1 muestra este criterio de división donde se puede apreciar que el oro submicroscópico y el oro ligado a superficies son difíciles de extraer por medios convencionales (molienda y CIL/Merrill-Crowe). Dentro del oro visible los teluros de oro son considerados refractarios y son difíciles de extraer por métodos convencionales.

Tabla 2.1.- Principales minerales de oro y portadores de oro



Fuente: (Zhou, 2012)

2.1 Refractariedad de mena aurífera

Según (Arias Arce , Coronado Falcón , Puente Santibañez , & Lovera Dávila , 2005) una cantidad significativa de oro puede estar íntimamente asociada con sulfuros y/o arsenuros, por lo cual recibe el nombre de mineral refractario. La mayoría de las veces, la cianuración de estos minerales requiere largos periodos de lixiviación y, desafortunadamente, bajas recuperaciones de oro. Los concentrados refractarios de oro también son sometidos a procesos pirometalúrgicos como la tostación, calcinación y fusión para lograr la oxidación y reducción de sus componentes, acarreando problemas de baja recuperación, prolongados periodos de tratamiento, contaminación al medioambiente, alto consumo de reactivos, alto costo operativo; entre otros.

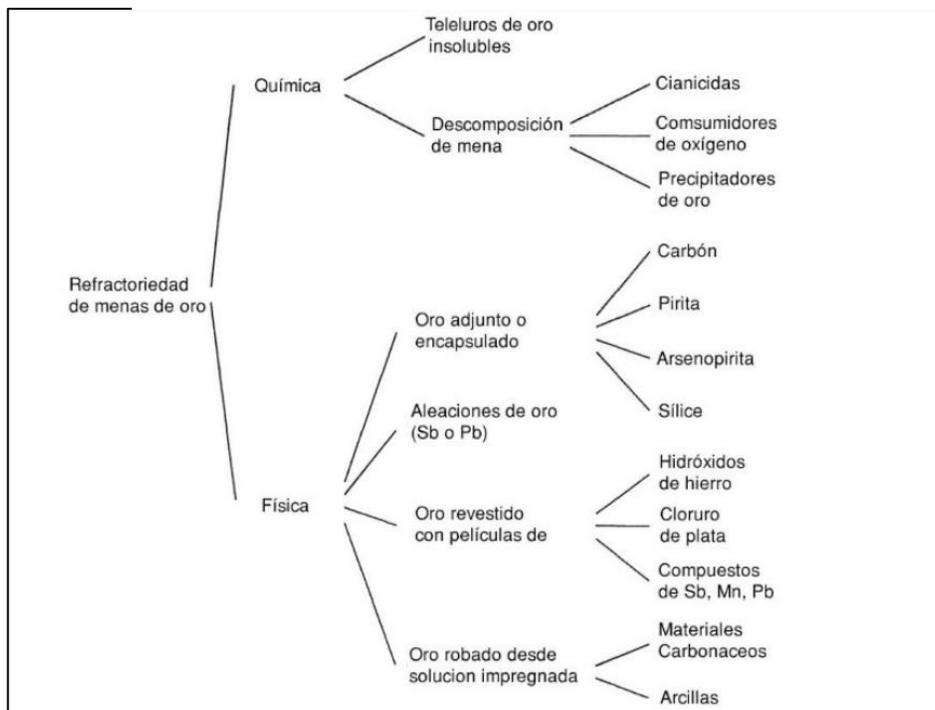
El conocimiento del uso de otras tecnologías para el tratamiento de los llamados concentrados refractarios nos ayudará a reducir y/o a minimizar dichos problemas. (Arias Arce , Coronado Falcón , Puente Santibañez , & Lovera Dávila , 2005)

Estos minerales refractarios pueden ser concentrados en el proceso previo de flotación antes de cianuración. Frecuentemente los metales preciosos están encapsulados en minerales de sulfuros de hierro, principalmente en piritita y arsenopiritita. (Iglesias & Carranza, 1993)

El conocimiento de la mineralogía de la mena es una herramienta poderosa para resolver problemas de procesamiento de minerales. El oro comúnmente ocurre naturalmente puro o mezclado con plata; sin embargo, debido a su baja concentración la respuesta de lixiviación depende del mineral que lo aloja. Una vez que la mineralogía del material es comprendida, se puede predecir si el material puede extraer por lixiviación directa o si se debe tomar medidas adicionales como lo indica (Barriga Vilca, 2019).

- Molienda más fina
- Ajuste de las condiciones de lixiviación (adición de oxidantes, alteración de pH para evitar solubilización de especies interferente, etc.).
- Uso de lixiviantes alternativos ácidos como básicos.
- Flotación para producir concentrados (o colas) que son más apropiados lixiviar.
- Tratamiento químico tal como tostación oxidación a presión u oxidación bacteriana para hacer que el oro sea accesible al lixiviantes o desactivar especies interferentes.

Figura 1.-Clasificación de refractariedad de menas de oro.



Fuente: (Yannopoulos, 1991)

- Encapsulamiento físico: Encapsulamiento de partículas submicroscópicas de oro en la matriz de sulfuros, lo que impide el contacto entre el cianuro y el oro. Este tipo de oclusión es común en menas portadoras de sulfuros tales como pirita y arsenopirita.
- Consumo excesivo de cianuro: La presencia de sulfuros y compuestos cianicidas como el Cu, Pb, Fe, entre otros, retardan la reacción durante la cianuración, ya que consumen demasiado cianuro y oxígeno.
- Limitación de oxígeno: Ciertos iones entre los que se encuentran el ion ferroso, el ion sulfuro, ion sulfato, entre otros, tienden a consumir el oxígeno cuando están disueltos, lo que limita la cantidad de este elemento, fundamental para el proceso de cianuración.
- Presencia de materiales carbonosos en el mineral: Residuos de hidrocarburos pesados, carbón grafitico o amorfo, entre otros, tienen la capacidad de adsorber los complejos solubles de oro y perjudican así la recuperación del metal.

Cuando el oro está asociado con sulfuros, la concentración por procesos de flotación es considerada frecuentemente. Cuando existe mezcla de oro libre y grueso con mineral refractario, se considera concentración gravimétrica en el bajo-flujo o descarga del hidrociclón para remover el oro grueso. (Hu, Sun, & Wang, 2009)

Los sulfuros que se obtienen de los procesos de molienda y clasificación, se concentran por flotación usando reactivos de regulación de pH como carbonato de sodio (cal hidratada es un depresor de oro libre e inhibe flotación de pirita), colectores y espumantes. En algunos casos se necesitará sulfato de cobre para acelerar la flotación de pirita y arsenopirita. (Barriga Vilca, 2019)

En el tratamiento de flotación de menas refractarias de oro dado a que estos minerales hacen que el proceso de recuperación sea bajo se tiene como objetivo incrementar las recuperaciones, aun con bajas leyes de oro en el concentrado si fuera necesario. Se ha analizado en donde se tenga oxidación parcial superficial de la pirita es necesario añadir sulfuro de sodio, su uso debe ser con precaución ya que el este deprime la flotación de oro libre El concentrado la flotación Rougher frecuentemente requiere remolienda para poder alimentar la flotación cleaning. (Barriga Vilca, 2019)

2.2 Arsenopirita (FeAsS)

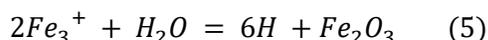
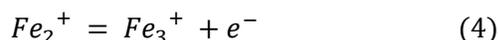
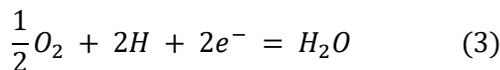
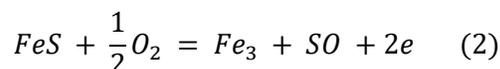
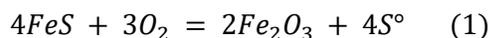
La arsenopirita es la fuente mineral de arsénico más común en la superficie terrestre. (Henaó Vásquez, 2014). Se puede encontrar en una variedad de sistemas tales como depósitos magmáticos, hidrotermales y pórfidos, entre otros.

Es por esto, por lo que la arsenopirita es comúnmente asociada a la aparición de oro, generando su amplia explotación y posterior descarga como desechos sólidos en los procesos mineros. Es estable bajo condiciones reductoras, pero sufre oxidación durante condiciones de intemperismo, liberando durante este proceso ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido trioxoarsénico (H_3AsO_3) y ácido sulfuroso (H_3AsO_4). La liberación de arsénico al medio ambiente causada por la oxidación de la arsenopirita, conllevan a una contaminación ambiental y peligros para la salud por esto es de gran importancia comprender los cambios que sufre bajo diferentes condiciones. (Corkhill & Vaughan, 2009)

2.2.1 Mecanismo de reacción de la arsenopirita

En los diferentes escenarios que se pueden proceder para las reacciones del arsénico, es necesario entender cómo se encuentra y reacciona este elemento en el mineral, en la biolixiviación del arsénico se analiza como As^{3+} o As^{5+} , puede ser solubilizado como $As(V)$ generando en el proceso precipitación de arsenato férrico (Santos Madrid, 2020)

Dado a que el arsénico contenido en la arsenopirita al estar sometido en una reacción de oxidación por medio de electrolisis se comporta similar a los sulfuros en minerales como la pirrotina, en donde se puede explicar de manera más sencilla y entendible como se puede romper los enlaces complejos como se muestra en las siguientes ecuaciones. Rickard, D. (2007).



La solución de esta reacción se enfoca en la transferencia de electrones, iniciando por la oxidación de los reactivos como se muestra en la ecuación (1). Esta al generarse una segunda reacción, ecuación (2), el ánodo de Fe permite generar como producto azufre separándolo de su estructura interna como sulfuro y electrones que dirigen al cátodo, en este extremo se evidencia burbujas de agua el cual es el oxígeno que este está produciendo como se demuestra en la ecuación (3), conjuntamente sucede la reducción de iones de Fe, ecuación (4), para así finalizar con la generación de hidrogeno a partir del ion férrico visto en la ecuación (5).

Esta muestra cómo puede suceder la oxido-reducción en una matriz de un mineral sulfurizado como se muestra en la figura 4, teniendo como base que la relación con el arsénico es similar, permitiendo reacciones semejantes en los tratamientos del mineral aurífero que se trataran en el próximo capítulo.

3. Pretratamientos para minerales auríferos con refractariedad

Basados en los procesos y las recomendaciones como evidencias experimentales en los estudios realizados, se destacan los pretratamientos que se realizan previos a los procesos principales para recuperación del mineral aurífero. Estos permiten eficiencias y recuperaciones más altas que las convencionales, siendo una alternativa para pretratar el mineral de arsénico, exponiendo y aumentando el área superficial del oro. A continuación, se describirán cuatro pretratamientos más destacados.

3.1.1 Oxidación con permanganato de potasio

Este pretratamiento se por medio de una reacción redox donde hay una transferencia de cinco electrones entre un oxidante y un reductor en medio ácido y tres en medio básico. Donde el oxidante en medio ácido de origen orgánico o inorgánico es el permanganato, con características como su versatilidad y sin hacer daños irreversibles al medio ambiente. Arroja buenos resultados al oxidar los sulfuros y enfocado en este caso a la arsenopirita, donde el ion permanganato compuesto por manganeso con su n estado de oxidación es +7, el permanganato de sodio y de potasio se tratan en con pH básico, teniendo en como característicos cristales compuestos de sales y el color violeta- morado. (Ferrer & Helaman , 2019)

3.1.2 Oxidación biológica

La oxidación biológica o biooxidación de minerales refractarios auríferos que contienen pirita y arsenopirita es empleada como una etapa de pretratamiento previo a la cianuración y ha demostrado ser un proceso económicamente viable y competitivo con un reducido impacto ambiental y reducidos costos de capital ya que no requieren temperaturas elevadas, ni nutrientes orgánicos para su desarrollo. (Ferrer & Helaman , 2019)

Dicho pretratamiento de minerales y concentrados a través de la biooxidación se consigue con microorganismos que crecen en medio ácido, que trabajan oxidando los sulfuros para obtener energía incorporando los electrones liberados al ciclo de citocromos, principalmente pirita y arsenopirita por lo tanto existe una liberación de oro y plata de la matriz de sulfuro. (Ferrer & Helaman , 2019). También se han encontrado tipos de

Para lograr una molienda fina a ultrafina es importante llevar el mineral sulfurado a un tamaño de partícula menor a diez micrones 10 μm , teniendo un P80 muy fino, esto implica tener precauciones en las características de cada mineral, como su fractura y cómo se comporta a medida que se va disminuyendo su tamaño, evitando partículas coloidales dentro del molino. Por esto es necesario una molienda controlada y en diferentes etapas con el fin de llegar a liberar el oro y dejarlo con mayor área superficial, de la manera más expuesta posible para así proceder al siguiente proceso como cianuración convencional. (Rickard & Luther III, 2007)

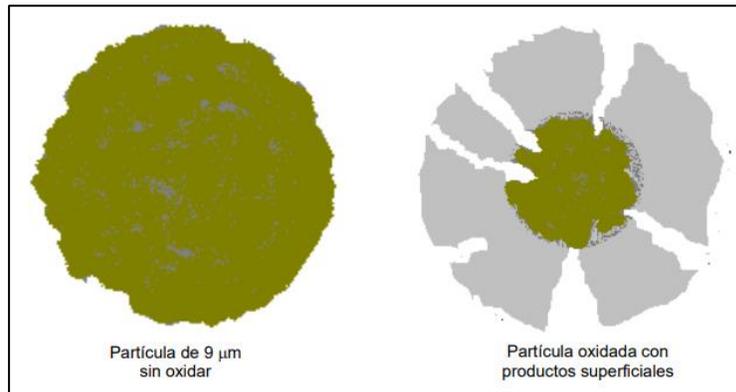
Con el apoyo de nuevas tecnologías es posible llevar la molienda de minerales hasta 2 μm , pero es importante resaltar que esto en caso implica altos costos de producción y de energía, por lo tanto, es indispensable la más de un proceso para llevar a cabo la recuperación de oro.

3.1.5 Tostación

El método tradicional más ampliamente empleado en el tratamiento de los minerales refractarios de oro y plata es la tostación oxidante de los concentrados de flotación. La tostación es un proceso industrial empleado para la conversión de sulfuros en sulfatos solubles, en solución ácida acuosa, permitiendo así la cianuración normal.

La siguiente reacción química nos muestra como la arsenopirita se oxida convirtiéndose en arsenato y azufre elemental. (M & D.W, 2012)



Figura 3.- Proceso de oxidación en partícula

Fuente: (M & D.W, 2012)

Este pretratamiento el cual consiste en una liberación química, por medio de altas temperaturas en un horno se crean corrientes de aire caliente el cual hacen que el mineral como la arsenopirita se oxide de manera rápida, separando el mineral de interés y los sulfuros se conviertan en gases como dióxido de azufre (SO_2). Luego de esto se puede llevar a otros procesos o tratamientos de concentración para aumentar la recuperación de oro (Elorza Rodríguez, 2022)

La tostación se efectúa cuando el oro está asociado íntimamente con minerales piríticos que dificultan la extracción de oro al nivel deseado; se hace esencial una tostación de la mena antes de la cianuración, para liberar el oro. Por ello muchos investigadores han escrito extensos artículos donde se describe, en forma comprensiva, la práctica de oxidación y reducción de los compuestos minerales. (Arias Arce , Coronado Falcón , Puente Santibañez , & Lovera Dávila , 2005)

La principal ventaja de la tostación oxidante, es la elevada eficiencia de extracción de oro y que resulta ser un proceso flexible. Desafortunadamente la emisión de gases como As_2O_3 y SO_2 tiene consecuencias ambientales significativas, aunado al impacto económico en el proceso si se tiene una responsabilidad social y se quiere evitar su presencia en el ambiente. (Santos Madrid, 2020).

Dado las restricciones ambientales y legales del arsénico regulado por el ministerio de salud, como el Decreto 547 DE 1996 , como de las emanaciones de dióxido de azufre y gases volatilizados, la tostación ha dejado de ser una alternativa inmediata y ha pasado a un segundo plano que por medio de nuevas tecnologías e investigaciones se pueda

encontrar reducciones de las emisiones y generar alternativas con los gases expuestos. A escala de laboratorio se espera poder controlar otras variables y parámetros para ser posible una escala industrial de liberación química y el análisis de los procesos metalúrgicos para la recuperación de Au.

Entendiendo cada proceso entre los cuales se tiene tratamientos como la flotación y la cianuración, para la recuperación de oro se puede evidenciar la importancia y los incrementos que genera al realizar pretratamientos como la destacable oxigenación para generar oxidación en la superficie del mineral de arsénico buscado la liberación del oro para así facilitar la concentración y aumentar el enriquecimiento de estos.

Los tratamientos llevados como un proceso metalúrgico posibilitan la recuperación en las plantas, implementando pretratamientos optimizan tiempos y reactivos dando solución a la gran problemática de contenido de arsénico relacionado en las menas auríferas. Los pretratamientos que implican variables como presión y temperatura dificultan llevarse a escala industrial.

Entendiendo como los sulfuros pasan por procesos químicos generando otra serie de óxidos y liberando el mineral de interés, son necesarios los análisis propios para cada mineral pues la relación fija con algún reactivo posibilita la gran incertidumbre del funcionamiento del tratamiento, además del medio controlado que implica cada proceso ya sea ácido o básico.

Es muy llamativo nuevas tecnologías sistematizadas las cuales permiten tener un control mayor sobre cada proceso disminuyendo los errores, evaluando cada mineral según sea el lote y los cambios con los que vienen según el frente y zona de explotación. Se debe tomar en cuenta la cinética de cada proceso como los índices metalúrgicos que arrojan las pruebas de laboratorio previas, para así llegar a procesos conjuntos de pretratamientos y tratamientos eficaces para el mineral de arsénico.

Se propone en la figura 8 un diagrama de flujo los pretratamientos y tratamientos a realizar a un mineral aurífero con presencia de arsénico.

Los tratamientos como la flotación según lo descrito y analizado dan mejores resultados si se realiza primero flotación cambiando diferentes no es solo una línea que se debe

ejecutar, es necesario encontrar diferentes configuraciones que lleven a optimizaciones mayores de recuperación de oro.

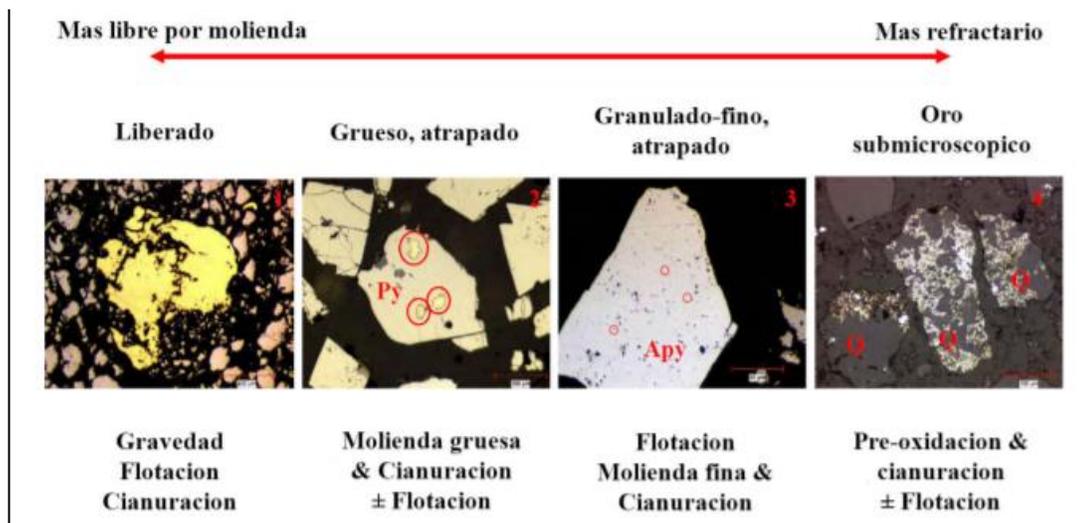
4. Tratamientos de menas auríferas.

La ciencia y tecnología dentro de la industria minera son necesarios para avanzar en el desarrollo y entendimiento de la complejidad del tratamiento a menas auríferas refractarias o asociadas a materiales que complican su obtención por lo tanto es necesario el conocimiento de los diversos métodos de tratamiento metalúrgico para una obtención alta de los metales preciosos deseados.

En los sulfuros a tratar se puede tener con bajas presiones y temperaturas oxidación en medio alcalino o no antes de la cianuración convencional, pero por el tamaño del oro de cada deposito es importante evaluar cómo se encuentra asociado en la matriz y con tamaños muy finos se requiere de procesos que necesitan tanto de más tiempo como de recursos económicos para poder ejecutarlos a gran escala. Procesos como tostación, lixiviaciones, remolienda, oxidación con alta presión y temperatura en varias fases.

4.1 Procesos metalúrgicos para tratar minerales auríferos

En el tratamiento de minerales es necesario realizar más de un proceso para obtener altas recuperaciones de oro, como se muestra en la figura X, al tener oro libre en la matriz del mineral por medio de molienda se puede liberar para realizar concentración gravimétrica, flotación y cianuración , pero a medida que este es más refractario se debe llevar a molienda más finas y pretratamientos para liberar el oro y que este quede con su área superficial más expuesta para los procesos que tendrán contacto directo en él.

Figura 4.- Tratamiento de menas auríferas asociadas a minerales de arsénico

Fuente: (Zhou, 2012)

Como se puede describir en la figura 4 se puede ver un ejemplo de oro y la relación con otros elementos, que permite en su estructura interna se pueda unir con otros metales y elementos estratégicos para la extracción y desarrollo de las investigaciones.

Los resultados indican que una remolienda a un P80 de 50 micras, seguido por una concentración por flotación posibilitan la recuperación hasta 70-75% del oro en un concentrado colectivo de pirita-arsenopirita. La separación de este último, usando como oxidante peróxido de hidrógeno a un ORP de +450 mV y pH de 6.0, producen un concentrado de pirita-oro con un grado de 7.20 g Au/Ton y recuperación global mayor a 50% del oro en residuos. (Elorza Rodriguez , Ma, M, & Caudillo González, 2022)

La asociación pirita-oro fue confirmada a través de la caracterización mineralógica sobre una porción de concentrado colectivo pirita-arsenopirita-oro, usando Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) de manera indirecta, electrones retro dispersados. No obstante que la asociación pirita-oro es favorable para su comercialización; arsenopirita quedaría en residuos, con ella la recuperación global de oro se reduce a 50%. En el caso de no hacer separación, la recuperación de oro pudiera ser mayor a 70%, en este caso el arsénico deberá ser recuperado, estabilizado y confinado de manera segura.

Los minerales auríferos se encuentran en la naturaleza en diversas formas; en algunos casos, la recuperación de oro por métodos convencionales es limitada y pobre, debido a que algunos constituyentes que acompañan al metal precioso hacen difícil o imposible el beneficio metalúrgico. (Azareña Ortiz , y otros, 2009)

Tabla 4.1.- Procesos metalúrgicos para tratar minerales auríferos complejos

Minerales Auríferos	Procesos
Mineral aurífero con:	Proceso (s)
Sulfuro de cobre	SART
Oro libre o nativo	Gravimetría-cianuración intensiva
Sulfuro de Cu, Pb y Zn	Flot-Tostación-Fundición-Ref
Teluros	Lixiviación HCl + Fe ³⁺
Antimonio	Lixiviación NaCl + HCl + Fe ³⁺ + Preaireación de Pb NO ₃ Cianuración
Arsénico	Oxidación biológica cianuración
Carbón	Oxidación con cloro cianuración
Marcasita/pirrotita	Aireación-Cianuración/ Aireación alcalina- Cianuración
Pirita	Oxidación alta temperatura (autoclaves)-Cianuración
Sulfuros consumidores de CN-	Thiourea
Refractarios carbonosos de baja ley	Oxidación biológica Heap - Lix. Thiosulfato

Fuente: (Azareña Ortiz , y otros, 2009)

Procesos como la oxidación biológica en la cianuración como lo presenta el proceso de la Tabla 3.2, permiten el control de los reactivos como el cianuro, ya que este los consume en velocidades muy altas controlando el medio en que se da. Los procedimientos que se especifican según el mineral asociado al aurífero permiten nuevas alternativas y control trayendo beneficios en la recuperación de oro. Los procesos metalúrgicos tienen como fin atacar el área superficial de la matriz del arsénico expuesta, variando parámetros como la presión se logra liberar y según sea el proceso concentrarlo, dando como resultado un residuo del mineral asociado el cual queda como relave y una recuperación oro. Además, existen diferentes tratamientos como se indicarán a detalle más adelante.

Existen procesos los cuales tienen como objetivo la oxidación de los minerales donde se encuentran reacciones por medio de la transferencia de electrones por medio de electricidad llamado electrolisis, donde se tiene un potencial que puede desintegrar los enlaces complejos que se identifican entre el mineral refractario y el oro. Esta transferencia que se puede dar por el voltaje suministrado permite la oxidación poco invasiva en el medio ambiente, gracias a los sulfuros quedan controlados en el medio y se convierten en sulfatos ya que en este proceso se dan reacciones simultáneamente como la oxidación del mineral

en su estructura interna como la óxido-reducción de los óxidos resultantes. (Ferrer & Helaman , 2019)

A continuación, se describirán los procesos y tratamientos esenciales que se destacan en diferentes estudios y experimentos, entendiendo de manera más detallada la relación entre el arsénico y el mineral aurífero, para el posterior análisis en la recuperación de oro.

4.1.1 Caracterización de mineralógica

Se debe tener en consideración que previo a cada tratamiento metalúrgico se debe realizar una caracterización mineralógica del material a tratar para así poder tener conocimiento total de todas las especificaciones que van a estar dentro del panorama de trabajo.

Los minerales de oro refractario se caracterizan por la presencia de partículas de oro ultrafinas diseminadas en la mineralización aurífera, o bien, de oro en solución sólida dentro de la matriz. Entre los comunes minerales portadores de oro refractario se encuentran la arsenopirita, la pirita y los sulfuros de cobre, que son muy resistentes a la extracción por cianuración estándar y suelen requerir un tratamiento previo para que la cianuración sea eficaz.

Hay muchos factores para tener en cuenta en la evaluación del mineral de oro refractario y hay disponibles múltiples opciones de pretratamiento, algunas de los cuales pueden ser más adecuadas para un mineral o proyecto en particular que otras. ALS es experto en todas las opciones y puede asesorar sobre un programa de pruebas adecuado para determinar la solución de procesamiento óptima. (Elorza Rodríguez, Enrique et al., 2022)

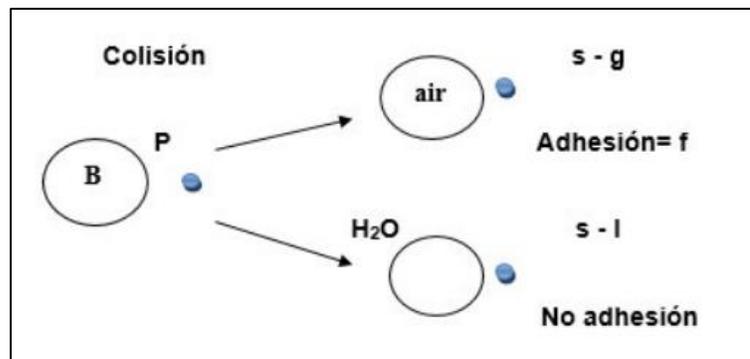
4.2 Flotación

La flotación el proceso para concentrar el oro fino cuando este se encuentra libre, ayuda incrementar la recuperación, considerando los procesos de concentración gravimétrica lleva a pérdidas del oro más fino y en procesos como la cianuración se encuentran impedimentos socio-ambientales. (Delgado Velasquez & Arce Rado, 2022)

Este puede ser una alternativa principal como tratamiento de mineral aurífero, al considerar diferentes variables, asociaciones de oro, variación de metales en la celda la flotación y

sus diferentes tipos pueden considerarse parte esencial en los tratamientos de mineral de arsénico.

Figura 5.- Diferencias entre las propiedades del mineral útil y la ganga



B= burbuja P= partícula S – g: sólido – gas S – l: sólido – líquido

Fuente: (Gutierrez Falcón, 2017)

4.2.1.1 Tipos de Flotación

Se describe los diferentes tipos de flotación que se pueden realizar en los tratamientos de mineral aurífero.

- Flotación por celda convencional tipo Denver o flotación por celda convencional tiene la función de hacer que las partículas que se han convertido en hidrofóbicas entren en contacto por medio de agitación, colectores, espumantes y en algunos casos depresantes, permiten que se adhieran a las burbujas de aire, de esta forma permiten que ciertas partículas que tienen su área superficial expuesta se eleven a la superficie y formen una espuma, la cual es removida posteriormente la cual es el concentrado de interés. (Monteros Quichimbo & Ramón Patiño, 2022)

Figura 6.- Celda Denver con sus respectivas partes

Fuente: (Chica Malla & Salinas Vazqu ez, 2017)

- Flotación Mecánica. - la introducción de aire es por aspiración, debido a la acción propia que tiene el agitador, este a su vez tiene forma de hélice produciendo una flotación casi perfecta de no ser por las espumas un poco impuras.
- Flotación Neumática. - se caracteriza porque la aireación se realiza vía aire comprimido, a través de un inyector o soplador, el aire introducido en la celda cumple la función de agitar, producir espumas y airear la pulpa, por lo que la cantidad de aire en exceso crea una desventaja en relación con otras máquinas de flotación. (Chica Malla & Salinas Vazqu ez, 2017)

En la flotación de oro en presencia de minerales refractarios con una primera etapa permite la concentración de sulfuros excluyendo la ganga, materia orgánica, y minerales diferentes a los asociados al oro; con una segunda etapa se logra limpiar estos sulfuros para los tratamientos posteriores, llevando a cabo pruebas de laboratorio e investigación previas se logra adecuar un proceso de flotación acorde al mineral.

Es necesario realizar este proceso de concentración para poder obtener relaves con bajo mineral de interés, en flotaciones tipo bulk se toman en cuenta parámetros como la dureza, el pH natural, porcentaje de sulfuro para así analizar la dificultad del tratamiento metalúrgico, es importante resaltar entender a qué mineral está asociado el oro y si exactamente es a la arsenopirita ya que puede estar asociada a otros como la piritita o pirrotina.

En estudios que se realizaron se encontró que procesos como la flotación previa a la cianuración incrementa los índices metalúrgicos y en los relaves quedan alrededor del 10% que también son recuperadas por cianuración en un proceso posterior, este estudio con su objetivo de investigar procesos y tratamientos, encontrando que la oxidación en un reactor con o sin medio alcalina aumenta la recuperación de oro. (Monteros Quichimbo & Ramón Patiño, 2022)

4.3 Cianuración

Este proceso metalúrgico es sumamente indispensable para la recuperación de oro, la cianuración convencional experimentalmente ha dado bajos resultados ya que la arsenopirita por su estructura y características superficiales consumiendo los reactivos e impide la eficaz concentración del oro dejando parte como material estéril. Se ha encontrado tratamientos de cianuración con amoníaco para minerales con altos contenidos de sulfuros los cuales pueden ser una alternativa para para el tratamiento con arsénico, este se analizó y dio como un bajo consumo de cianuro permitiendo un proceso más eficiente. Luego se realizan pruebas donde se logran optimizar las cantidades de reactivos a usar por medio de la lixiviación selectiva.

También se tiene otro tratamiento añadiendo bajas presiones a la cianuración realizándolo en un reactor el cual permita tener control sobre estas presiones además de la temperatura las cuales se aumentan, al realizar la agitación y añadiendo oxigenación previa.

4.4 Análisis de reacción del sistema heterogéneo mineral de arsénico

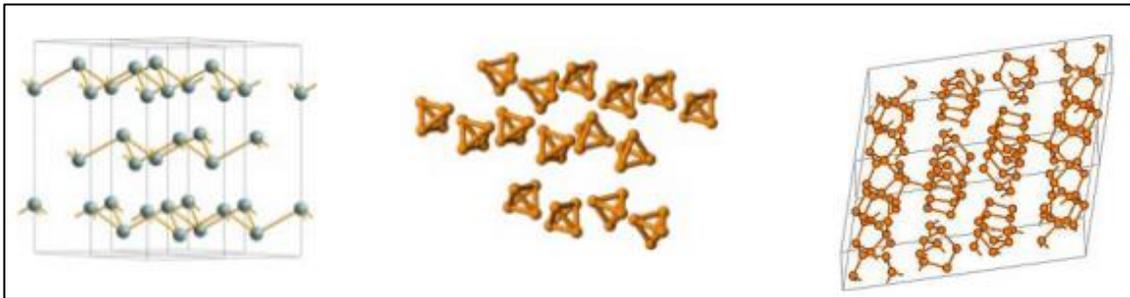
Los tratamientos que se analizan permiten realizar una separación entre minerales en una matriz la cual puede ser procesada para concentrar el mineral de interés. Cambia si estos tratamientos se observan de manera heterogénea, esto permite ver por aparte cada mineral tanto el arsénico como el oro, los enlaces que generan cada uno por aparte y su comportamiento individual en los diferentes tratamientos.

En las reacciones el arsénico se puede ver alteradas por su comportamiento donde en ocasiones se comporta en metal, pero al ser liberado puede cambiar a reaccionar como un no metal. Por su ubicación en la tabla periódica podría responder a tratamientos que impliquen conductividad eléctrica, con un 3.45×10^6 S/m similar al del barrio y plomo se tendría una reacción controlada. (Gasque Silva, 2013).

En medios como flotación y cianuración se entiende que también sucede una concentración de arsénico el cual es el relave de estos procesos, en estudios realizados se ha demostrado que es posible concentrar este elemento, en el experimento por Petkova Simeonova, V. (1999) se evidencian hasta 3 mg/l, en un medio con un pH de 2, lo cual es lo contrario al medio en cual se lleva a cabo los tratamientos mencionados ácidos con pH entre 8-10, haciendo más complejo la eficiencia del reactivo en el arsénico.

Además, se resalta la relación con otros elementos como el Cobre se ha llevado de manera más viable por procesos como la flotación, aunque sigue siendo un gran reto por sus enlaces en el sistema cristalino que genera con los metales como el Au, Cu y Ag. Chacón, L., Ruiz, F., & Zapico, R. (2005). Como se muestra en la siguiente figura, se puede ver cómo es definida y en según el mineral se puede hacer más compacta, siendo está más difícil de romper sus enlaces donde oro se posiciona en los extremos o en el interior del sistema, haciendo más difícil su recuperación.

Figura 7.- Formas alotrópicas del As y sus estructuras: de izquierda a derecha: gris, amarillo y negro.



Fuente (Gasque Silva, 2013).

Para esto, se ha evaluado la posibilidad de generar procesos previos que permitan debilitar los enlaces que genera el arsénico y facilitando tener un medio controlado en los procesos; con base en esto han surgido diferentes investigaciones donde analizan esta nueva fase de los pretratamientos, convirtiéndose en una posible solución para la recuperación de oro.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

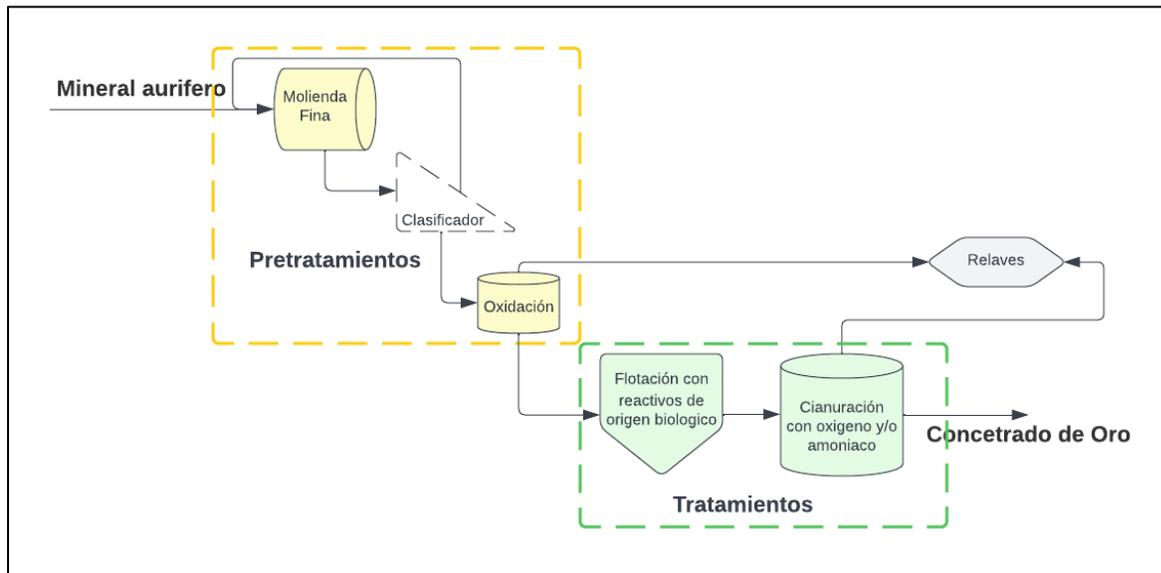
Al analizar los diferentes tratamientos que se pueden aplicar a los minerales auríferos con arsénico, se observa la necesidad de complementar procesos donde unos complementan a otros, dando resultados altos en la recuperación de oro. Además, Los tratamientos pueden dar resultados diferente dado a las características mineralógicas diferentes de las zonas, pero pueden generar mejores resultados en plantas de beneficio donde las recuperaciones son bajas por la dificultad que genera la refractariedad en el mineral.

Es necesario los pretratamientos para tratar la matriz, así poder exponer y generar una mayor área superficial del oro, permitiendo que los tratamientos posteriores sean más eficientes.

Aunque en los últimos años se han generado múltiples investigaciones con respecto a la refractariedad, aún no se establece un tratamiento el cual se pueda unificar y estandarizar para tratar los minerales asociados, con el seguimiento y experimentación se podría recopilar más información permitiendo complementar procesos para el sector industrial.

Se puede concluir con la información recopilada en el análisis de cada tratamiento es importante tener el control de las variables como la presión y la temperatura, la cantidad de reactivos que se usan en los procesos y los tiempos en que se realizan, el control de esta y la variaciones afectan directa o indirectamente haciendo que sean ineficientes, en caso donde las variables son difíciles de controlar, se puede llevar los procesos a medios donde se tengan bajo control y se puedan interactuar con otras variables.

Se realiza una propuesta de un proceso para el mineral aurífero enfocado en la separación de arsénico presente en el mineral, con el fin de aumentar la recuperación de oro así como incrementar sus tenores.

Figura 8.- Propuesta de tratamiento para recuperación de Au

Fuente: Elaboración propia

Por medio de un circuito donde el mineral llega con un proceso previo de conminución, ingresa a una fase de pre-tratamientos iniciando con una molienda fina-ultrafina, buscando mayor liberación de las partículas y generación de área superficial, luego pasan por clasificación donde las partículas que cumplen con el tamaño deseado pasan a la parte de oxidación, allí se realiza la oxidación del arsénico teniendo diferentes propuestas como la oxidación con permanganato de sodio o potasio, como también oxidación bacteria.

Posteriormente entra a la segunda fase de los tratamientos, donde se busca concentrar el mineral de interés inicialmente por el proceso de flotación controlando el medio en el que se realiza (pH), además se propone colectores de origen biológico los cuales permitirán mayor adhesión en la superficie del oro. Continuamente, se procede a la cianuración con oxigenación generando mayor oxidación en las partículas que en la anterior fase no reaccionaron en su totalidad, esto permite que la cianuración sea más rentable y eficiente; logrando así por medio de todo el circuito la recuperación de oro de manera eficaz.

5.2 Recomendaciones

Se sugiere nuevas investigaciones donde se analizan las propiedades químicas y termodinámicas de las reacciones que se generan en la oxidación del arsénico, para así generar posibles tratamientos dado a la transferencia de electrones y energía, generando nuevas alternativas con el óxido resultante que pueda ser beneficioso para la industria y el medio ambiente.

Dado a la complejidad en el control de variables como la presión y la temperatura a escala industrial, se propones en próximos procesos a experimentar se realicen en medios donde estas están en condiciones de ambiente, pues hace que estos procesos dando buenos resultados se puedan implementar con mayor facilidad a las plantas de beneficio de mineral aurífero.

Se recomienda realizar un estudio de los relaves donde quedan los óxidos de arsénico que no fueron analizados en la figura 8 escrita anteriormente, ya que el objetivo del trabajo es investigar sobre los posibles tratamientos para una mejor recuperación de oro.

Bibliografía

- Arias Arce , V., Coronado Falcón , R., Puente Santibañez , L., & Lovera Dávila , D. (2005). Refractoriedad de concentrados auríferos . *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG*, Vol 8, N° 16, 1.
- Azareña Ortiz , A., Núñez Jara , P. A., Aramburú Rojas, V. S., León Delgado, E. F., Quiñones Lsvado, L. J., Cabrera Sandoval , M., . . . Alarcón Guizado, J. N. (2009). Factores que afectan la selección del proceso metalúrgico para beneficiar minerales de oro. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG* , 1-7.
- Ballester , A., Verdeja, L. F., & Sancho , J. (2000). *METALURGIA EXTRACTIVA: PROCESOS DE OBTENCION (VOL. II)*.
- Barriga Vilca, A. (2019). *Estudio de la extracción de oro de concentrados refractarios mediante el proceso albion*. Arequipa-Perú : Universidad Nacional de San Agustín, Facultad de Ingeniería de procesos escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica.
- Botero Vargas, J. (2021). *Estudio de mecanismo de cianuración de oro considerando interacciones fisicoquímicas de interfase*. Medellín-Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales.
- Brostigen, G., & Kjekshus, A. (1969). Redetermined crystal structure of FeS₂ (Pyrite). *Acta Chemica Scandinavica* , 2186.
- Cáceres Arenas, G. (2007). *Hidrometalurgia*. Atacama: Universidad de Atacama.
- Chavez Flores, P. O. (2014). *Determinación de la dosificación óptima de cianuro para lograr la mayor recuperación de oro y plata en el proceso de lixiviación intensiva de concentrados*. Arequipa-Perú: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Chica Malla, R. A., & Salinas Vazquez, G. J. (2017). *Concentración de sulfuros de mineral de cobre (calcopirita), mediante el proceso de flotación con la variación del pH y tres tipos de colectores*. Cuenca-Ecuador: Universidad del Azuay.
- Corkhill, C. L., & Vaughan, D. J. (2009). Arsenopyrite oxidation-A review. *School of Earth, Atmospheric and Environmental Sciences, Williamson Research Centre for Molecular Environmental Science, University of Manchester*,.

- Delgado Velasquez, C. D., & Arce Rado, A. J. (2022). *Efecto de la cianuración intensiva en reactor IRL para tratar concentrados de flotación de minerales argentíferos de una mina ubicada en la región de Arequipa*. Arequipa-Perú: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Elorza Rodriguez , E., Ma, A. M., M, & Caudillo González, M. (2022). *Flotación colectiva pirita-arsenopirita-oro de los residuos de Noche Buena, Zac., y su separación en concentrados pirita-oro y arsenopirita*. Uaslp.mx.
- Ferrer , G., & Helaman , M. (2019). *Caracterización y tratamiento por cianuración de sulfuros para la recuperación de oro en Quío-Ambo-Huánuco*. Cerro de Pasco-Perú.
- Gasque Silva, L. S. (2013). Arsénico, el elemento inclasificable . *Educación Química*, 24, 495-500.
- Gutierrez Falcón, L. S. (2017). *Estudio del tratamiento de minerales sulfurados auríferos mediante procesos secuenciales de flotación, Lixiviación alcalina, biolixiviación y cianuración para la recuperación de oro*,. Lima. Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Henao Vásquez, M. (2014). Notas de mineralúrgia. parte II. *Unal.edu.co*.
- Hu, Y., Sun, W., & Wang, D. (2009). *Electrochemistry of flotation of sulphide minerals*. Central South University-Changsha, 410083, China: ISBN978-3-540-92178-3. SpringerDordrecht Heidelberg London NewYork.
- Iglesias, N., & Carranza, F. (1993). Refractory gold-bearing ores: a review of treatment methods and recent advances in biotechnological techniques. *Elsevier Science B.V.*
- Linge , H. G. (1994). Tipos de minerales y tratamientos convencionales. *Minerals Engineering*.
- M, H., & D.W, T. (2012). *Commercialization of the Albion process*. Perth, Australia : Alta Conferences.
- Monteros Quichimbo , W. I., & Ramón Patiño, V. E. (2022). *Análisis de la cinética de flotación en celda convencional y en columna de material aurífero perteneciente a la planta COMINCOBOS, Camilo Ponce Enriquez-Azuay*. Cuenca-Ecuador: Universidad del Azuay.
- Rickard, D., & Luther III, G. W. (2007). Chemistry of Iron Sulfides. *Chemical Review*, 514-562.
- Romero Aliaga, F. (2018). *Recuperación de oro a partir de piritas auríferas*. Tacna - Perú : Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

- Saavedra , A., & Cortón, E. (2014). Biotecnología microbiana aplicada a la minería. *Química Viva Vol 13/ Número 3*.
- Santos Madrid, R. (2020). *Evaluación de cuatro métodos para recuperación de oro a partir de un mineral refractario*. Chihuahua-México.
- Valencia Giraldo , A. (2013). El Oro: de la alquimia a la relatividad. *Revista Colombiana de Materiales N°4* , 1-24.
- Villadevall Solé, M. (2016). El oro y la batea. *Universidad de Barcelona.*, 8.
- Yannopoulos, J. C. (1991). *The Extractive Metallurgy of Gold*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Zhou, J. (2012). The mineralogy of gold and importance on gold metallurgy. *Gold processing Workshop COM2012 Niagara Falls* , 16.