



UNIVERSIDAD NACIONAL “SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO”

ESCUELA DE POSTGRADO

RECUPERACIÓN DE ORO DEL MINERAL ARSENOPIRITA POR CIANURACIÓN EN PILAS DE MINAS ARTESANALES DE COLCABAMBA - 2017

Tesis para optar el grado de Maestro
en Ingeniería de Minas

Mención: Sistema de Gestión Integral Minera

DIEGO WILMER DOMÍNGUEZ LEYVA

Asesor: **Dr. JULIÁN PÉREZ FALCÓN**

Huaraz - Áncash – Perú

2024

Nº de Registro: T0961





UNIVERSIDAD NACIONAL
"SANTIAGO ANTUNEZ DE MAYOLO"
ESCUELA DE POSTGRADO

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

Los miembros del Jurado de Sustentación de Tesis, que suscriben, reunidos en acto público en el Auditorio de la Escuela de Postgrado, de la Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo" para calificar la Tesis presentada por el:

Bachiller : **DOMINGUEZ LEYVA DIEGO WILMER**

Título : **RECUPERACIÓN DE ORO DEL MINERAL ARSENOPIRITA POR CIANURACIÓN EN PILAS DE MINAS ARTESANALES DE COLCABAMBA - 2017**

Después de haber escuchado la sustentación, las respuestas a las preguntas y observaciones finales, la declaramos:

APROBADO, con el calificativo de QUINCE (15)

De conformidad al Reglamento General a la Escuela de Postgrado y al Reglamento de Normas y Procedimientos para optar los Grados Académicos de Maestro y Doctor, queda en condición de ser aprobado por el Consejo de la Escuela de Postgrado y recibir el Grado Académico de Maestro en **INGENIERÍA DE MINAS** con Mención en **SISTEMA DE GESTIÓN INTEGRAL MINERA**, a otorgarse por el Honorable Consejo Universitario de la UNASAM.

Huaraz, 08 de junio del 2023



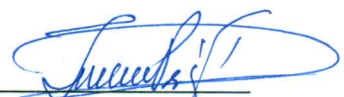
Dr. Javier Enrique Sotelo Montes
PRESIDENTE



Dr. Gustavo Roberto Bojorquez Huerta
SECRETARIO



Mag. Arnaldo Alejandro Ruiz Castro
VOCAL



Dr. Julian Pérez Falcon
Asesor

Anexo de la R.C.U N° 126 -2022 -UNASAM
ANEXO 1
INFORME DE SIMILITUD.

El que suscribe (asesor) del trabajo de investigación titulado:

RECUPERACIÓN DE ORO DEL MINERAL ARSENOPIRITA POR CIANURACIÓN EN
PILAS DE MINAS ARTESANALES DE COLCABAMBA - 2017

Presentado por: DIEGO WILMER DOMÍNGUEZ LEYVA

con DNI N°: 42806622

para optar el Grado de Maestro en:

Ingeniería de Minas con Mención: Sistema de Gestión Integral Minera

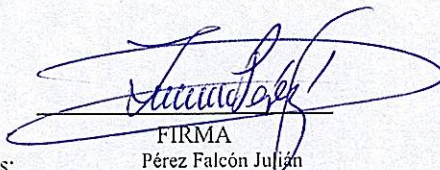
Informo que el documento del trabajo anteriormente indicado ha sido sometido a revisión, mediante la plataforma de evaluación de similitud, conforme al Artículo 11° del presente reglamento y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de : 14 % de similitud.

Evaluación y acciones del reporte de similitud para trabajos de investigación, tesis posgrado, textos, libros, revistas, artículos científicos, material de enseñanza y otros (Art. 11, inc 2 y 3)

Porcentaje	Evaluación y acciones	Marque Con una X
Del 1 al 20%	Esta dentro del rango aceptable de similitud y podrá pasar al siguiente paso según sea el caso.	X
Del 21 al 30%	Devolver al autor para las correcciones y se presente nuevamente el trabajo en evaluación.	
Mayores al 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes; sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de **Asesor responsable**, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera hoja del reporte del software anti-plagio.

Huaraz, 01/02/2024


FIRMA
Pérez Falcón Julián

Apellidos y Nombres: _____

DNI N°: _____

10117064

Se adjunta:


1. Reporte completo Generado por la plataforma de evaluación de similitud

MIEMBROS DEL JURADO

Doctor Javier Enrique Sotelo Montes Presidente



Doctor Gustavo Roberto Bojorquez Huerta Secretario



Magister Arnaldo Alejandro Ruiz Castro Vocal



ASESOR

Doctor **Julián Pérez Falcón**



AGRADECIMIENTO

- A la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo por brindar su apoyo en mi perfeccionamiento en la Maestría en Ingeniería de Minas con mención en Sistema de Gestión Integral Minera.
- A mi asesor por brindar sus consejos y experiencia para el desarrollo de mi tesis.
- Agradezco con mucho cariño, a mis queridos padres por su apoyo constante hasta obtener el Grado Académico de Maestro con mención: Sistema de Gestión Integral Minera

Al Divino creador, por guiar mi vida

y a mis queridos padres

por mi existencia.

ÍNDICE

	Página
Resumen	ix
Abstract	x
INTRODUCCIÓN	1-2
Capítulo I	3
PROBLEMA DE INVESTIGACION	3
1.1 Planteamiento y formulación del Problema	3
1.2 Objetivos	4
1.3 Justificación	5
1.4 Delimitación.....	5
1.5 Ética de la investigación	6
Capítulo II	7
MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Antecedentes de la investigación	7
2.2. Bases teóricas	19
2.3. Definición de términos.....	19
2.4. Hipótesis	19
2.5. Variables	22

Capítulo III	26
METODOLOGÍA	26
3.1. Tipo de investigación	26
3.2. Diseño de investigación	26
3.3. Población y muestra	26
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	26
3.5. Plan de procesamiento y análisis estadístico de datos.....	27
Capítulo IV	28
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
4.1. Presentación de Resultados.....	28
4.2. Prueba de hipótesis	34
4.3. Discusión	34
Conclusiones	37
Recomendaciones.....	39
Referencias Bibliográficas	41
Anexos	45

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. <i>Granulometría mineral mina Chapapunta.</i>	29
Tabla 2. <i>Granulometría mineral mina San Francisco.</i>	29
Tabla 3. <i>Condiciones para la prueba de lixiviación mina Chapapunta.</i>	30
Tabla 4. <i>Prueba de lixiviación en botella con NaCN del mineral de mina Chapapunta.</i>	31
Tabla 5. <i>Condiciones para la prueba de lixiviación mina San Francisco.</i>	32
Tabla 6. <i>Prueba de lixiviación en botella con NaCN del mineral de mina Chapapunta.</i>	32
Tabla 7. <i>Balance de prueba metalúrgico - mina Chapapunta.</i>	33
Tabla 8.Tabla 10. <i>Balance de prueba metalúrgico - mina San francisco.</i>	33

Resumen

La tesis tiene por objetivo recuperar oro del mineral arsenopirita por cianuración en pilas de minas artesanales de Colcabamba – 2017. La investigación es cualitativa, aplicada de tipo descriptivo. De los resultados se demostró que es posible la recuperación del oro a partir de los minerales de arsenopirita por cianuración, mediante los muestreos y análisis del mineral en los laboratorios; asimismo precisar que no todos los minerales de arsenopirita de la zona de Colcabamba contienen oro de alta ley. A su vez, se comprobó que el método de recuperación con NaCN y cal es adecuado para minerales que no tienen contenidos de sulfuros y otros cianicidas; mientras que, en los minerales que contienen As, Fe y otros sulfuros, la recuperación adecuada es por el método de flotación, según las pruebas metalúrgicas de lixiviación y flotación presentados en los resultados. La conclusión más importante a la que se arribó es que es factible la recuperación del oro a partir de los minerales de arsenopirita por lixiviación (cianuración) con NaCN y cal de las minas artesanales de Colcabamba, llegándose a recuperar en la mina Chapapunta el 89.35% y San Francisco 89.90%, en relación a las variables de investigación.

Palabras claves: Recuperación de oro, Mineral arsenopirita, Cianuración, Pilas de minas artesanales, Colcabamba: 2017.

ABSTRACT

The general objective of the thesis is to recover gold from arsenopyrite ore through cyanidation in artisanal mines in Colcabamba - 2017. The methodology of scientific research was applied, specifically descriptive applied research. From the discussion of results, it was demonstrated that gold recovery from arsenopyrite minerals through cyanidation is possible, based on mineral sampling and analysis in laboratories. It is important to note that not all arsenopyrite minerals in the Colcabamba area contain high-grade gold. Additionally, it should be specified that the recovery method using NaCN and lime is suitable for minerals without sulfur and other cyanicides, while minerals containing As, Fe, and other sulfides are best recovered through the flotation method, as shown by the metallurgical leaching and flotation tests presented in the results. The most significant conclusion was that gold recovery from arsenopyrite minerals through leaching (cyanidation) with NaCN and lime is feasible in the artisanal mines of Colcabamba, achieving a recovery rate of 89.35% in the Chapapunta mine, 89.90% and San Francisco, considering the variables considered in the research.

Keywords: Gold recovery, Arsenopyrite mineral, Cyanidation, Artisanal mine heaps, Colcabamba: 2017.



INTRODUCCIÓN

En la zona de Colcabamba hay pequeñas empresas artesanales dedicadas a la extracción de minerales de oro. Sin embargo, estas empresas desconocen si los minerales que extraen tienen leyes de cabeza adecuadas para ser económicamente comerciables y si es posible recuperar el oro de los minerales que contienen arsénico, hierro y óxidos. Actualmente, se limitan a vender el mineral a granel sin procesar. Por esta razón, el interés en investigar la recuperación del oro mediante el método de lixiviación con NaCN, cal y otras variables de operación que se indican en las pruebas metalúrgicas en botella.

Las pruebas demuestran que es factible recuperar el oro de los minerales mencionados mediante la lixiviación. Además, las pruebas metalúrgicas utilizando el método de flotación muestran una buena recuperación en caso de que los minerales de oro estén presentes en forma de sulfuros. Esta investigación es importante porque ayudará a los mineros artesanales a conocer las características de los minerales, la ley de cabeza del oro y el método adecuado de recuperación según el tipo de mineral. Esto les proporcionará ventajas en la comercialización y, por lo tanto, beneficios económicos y sociales tanto para los empresarios como para los trabajadores que laboran en estas unidades mineras.

En esta zona, la mayoría de las personas dependen exclusivamente de la agricultura debido a la falta de oportunidades laborales en otras actividades económicas. Por lo tanto, esta investigación puede permitir nuevas posibilidades y mejorar la calidad de vida de la comunidad minera en Colcabamba.

La tesis tiene cuatro capítulos. En el capítulo I se describe el problema de investigación, se presentan los objetivos e hipótesis, se justifica y da relevancia a la investigación. En el capítulo II se presentan los antecedentes sobre estudios anteriores tanto a nivel internacional como nacional y las principales bases teóricas que sustenta el trabajo. En el capítulo III se detalla la metodología empleada con el tipo de investigación, diseño, muestra, instrumentos y los estadísticos seleccionados para el análisis de los datos. En el capítulo IV se evidencian los resultados y la discusión en función a los objetivos de investigación. Finalmente, se describen puntualmente las conclusiones y recomendaciones de la presente investigación.

Capítulo I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento y formulación del Problema

1.1.1. *Planteamiento del problema*

Muchas empresas artesanales que cuentan con minerales de arsenopirita con alta ley de oro, que son económicamente rentables, no procesan y recuperan el oro por falta de apoyo técnico-metalúrgico y/o aplican métodos de recuperación, que en gran parte no son recuperables, porque tratan directamente a través de lixiviación in-situ o sin determinar los diferentes parámetros que deben ser establecidos mediante pruebas metalúrgicas.

En la zona de Colcabamba existen muchos yacimientos mineros artesanales, cuyo mineral principal es la arsenopirita con altos contenidos de oro y que no son procesados por desconocimiento de métodos de recuperación. La recuperación de oro del mineral arsenopirita es posible por cianuración en pilas, porque puede ser aplicado por los mineros artesanales de la zona, en vista de que es un proceso novedoso y relevante para que los mineros artesanales pueden formalizarse y trabajar sus unidades a fin de generar sus propios ingresos y dar oportunidad de trabajo a muchos pobladores de la zona, a través del uso de esta tecnología y así obtener los beneficios económicos que se han de evidenciar a través del presente trabajo de investigación.

En el caso particular se recuperó este mineral a través de cianuración en pilas de minas artesanales, previa evaluación mineralógica, contenidos de los minerales

sulfuros primarios, ganga y la aplicación determinada de métodos adecuados de recuperación del oro.

1.1.2. Formulación del problema general de investigación

¿Cuál es la viabilidad técnica, económica y ambiental de aplicar el método de cianuración en pilas para la recuperación de oro a partir del mineral de arsenopirita en las minas artesanales de Colcabamba durante el año 2017?

1.1.3. Formulación de problemas específicos

¿Cuáles son las propiedades mineralógicas y composición química de los minerales de arsenopirita con alto contenido de oro?

¿Cuál es la eficacia de la cianuración en pilas para extraer el oro de los minerales de arsenopirita en Colcabamba?

¿Cuáles son los costos asociados a la implementación de la cianuración en pilas para la recuperación de oro en Colcabamba, considerando los insumos y operaciones necesarias?

1.2 Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Recuperar oro del mineral arsenopirita por cianuración en pilas de minas artesanales de Colcabamba - 2017

1.2.2. Objetivos específicos

Determinar las propiedades mineralógicas y la composición química de los minerales de arsenopirita con alto contenido de oro en Colcabamba.

Evaluar la eficacia de la cianuración en pilas como método de extracción de oro de los minerales de arsenopirita en Colcabamba.

Calcular los costos totales involucrados en la implementación de la recuperación de oro del mineral arsenopirita por cianuración en pilas de minas artesanales de Colcabamba.

1.3 Justificación

Justificación social

Se justifica porque esta actividad brinda la oportunidad de generar ingresos y empleo para los mineros artesanales, lo que contribuye a mejorar su calidad de vida y la de sus familias. Además, al implementar técnicas de cianuración en pilas se busca maximizar la eficiencia en la recuperación del oro, lo que resulta en un mayor beneficio económico para los mineros y la comunidad en general. Este enfoque también puede fomentar la formalización de las actividades mineras, promoviendo el cumplimiento de normativas y regulaciones, lo cual a su vez garantiza la seguridad y la protección del medio ambiente. La recuperación de oro mediante cianuración en pilas representa una oportunidad para impulsar el desarrollo sostenible en Colcabamba, impulsando el crecimiento económico local y fortaleciendo la estructura social de la comunidad.

1.4 Delimitación

1.4.1. Delimitación teórica

La delimitación teórica se centra en el estudio de la recuperación de oro mediante cianuración en pilas, enfocándose en las minas artesanales de Colcabamba durante el año 2017, considerando aspectos técnicos, económicos y ambientales específicos de esta práctica.

1.4.2. Delimitación temporal y espacial

La delimitación temporal se enfoca en el año 2017; mientras que, la delimitación espacial se centra en las minas artesanales de Colcabamba para la recuperación de oro mediante cianuración en pilas.

1.5 Ética de la investigación

La ética de la investigación en la recuperación de oro del mineral arsenopirita por cianuración en pilas de minas artesanales de Colcabamba en 2017 implica asegurar el respeto por los derechos humanos, el cuidado del medio ambiente y la integridad de los participantes. También divulgar información precisa y objetiva, obtener el consentimiento informado de los involucrados y asegurar la confidencialidad de los datos recopilados. Además, es fundamental considerar el impacto social y económico de la investigación, buscando contribuir al desarrollo sostenible de la comunidad, promoviendo la equidad y la justicia en todas las etapas del estudio (Open AI, 2023).

Capítulo II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

La recuperación de oro del mineral arsenopirita por cianuración en pilas de minas artesanales ha sido previamente investigada y documentada en diversas publicaciones científicas y tesis tanto a nivel internacional como nacional.

A nivel internacional

Enderica (2023) en su trabajo de investigación presenta los resultados de una investigación basada en fuentes bibliográficas y el análisis subsiguiente de la extracción metalúrgica de oro a partir de minerales que contienen arsénico. Se describen las características químicas y mineralógicas de estos minerales, así como los posibles tratamientos metalúrgicos para mejorar las condiciones de extracción en presencia de minerales de arsénico, los cuales tienen una capacidad relativamente baja de formar complejos bajo las condiciones físico-químicas de la cianuración del oro. Se llega a la conclusión de que existen opciones mineralúrgicas relacionadas con las características mineralógicas de los minerales. Esto plantea un desafío de investigación para la explotación de depósitos de oro asociados a minerales de arsénico.

Lalvay (2023) en su investigación enfocada en la recuperación de oro tuvo objetivo comparar la eficiencia del cianuro y la tiourea en la lixiviación de material aurífero para determinar con cuál de los dos se logra una mayor del mineral. Se llevaron a cabo pruebas de lixiviación en celdas de laboratorio a escala reducida, como parte del trabajo de investigación. Se variaron varios parámetros operativos

en los ensayos, incluyendo la fracción de sólidos (15%, 30%), el tiempo de lixiviación (150 min, 300 min, 450 min y 600 min), la concentración de cianuro (0.3 g/l, 0.6 g/l, 0.9 g/l) y la concentración de tiourea (4 g/l, 8 g/l, 12 g/l). En total, se realizaron 48 experimentos. Después de analizar los resultados, se encontró que con una fracción de sólidos del 15% y un tiempo de 600 min, la tiourea logró una recuperación del 98% de oro. Asimismo, con una fracción de sólidos del 30% y el mismo tiempo el cianuro logró una recuperación del 89.8%.

A nivel nacional

Avila (2022) con su investigación se enfocó en diseñar y evaluar un sistema de agitación para procesar oro en minerales sulfurados de la región de Lea. Se buscaba contar con un dimensionamiento y características específicas que permitieran una operación eficiente y promovieran la productividad de las plantas metalúrgicas correspondientes. Para ello, se buscó el diseño y la evaluación de un sistema de agitación para la cianuración del oro dependen de la velocidad de agitación, el tipo de agitador y el volumen de líquido a tratar. Mediante técnicas de dimensionamiento de equipos de proceso, se determinó un sistema de agitación compuesto por un tanque cilíndrico de 2.942 m de diámetro, 3.825 m de altura y un 23% de volumen de seguridad. Además, se utilizaron 4 placas deflectoras y un agitador con un impulsor de turbina de disco que contaba con seis placas planas de 0.981 m de diámetro (0.196 m de ancho y 0.245 m de longitud de cada placa). Se estimaron las viscosidades de la solución cianurada y de la suspensión utilizando correlaciones experimentales de referencia. Con base en estos cálculos, se estableció una velocidad de rotación del agitador de 155.76 rpm y se seleccionó un motor de 134.834 HP para poner en funcionamiento el sistema de agitación.

Obando (2020) en su tesis indica que el género *Streptomyces* es ampliamente utilizado debido a su valor biotecnológico y su capacidad para sobrevivir en ambientes extremos. En este estudio, se utilizaron cuatro cepas de *Streptomyces* aisladas de concentrados mineros. El objetivo fue caracterizar fenotípica y genéticamente estas cepas, así como evaluar su capacidad de lixiviar arsénico del mineral de arsenopirita y los mecanismos relacionados en dicho proceso. Las cepas fueron caracterizadas fenotípicamente mediante su crecimiento en medio XGAL y su metabolismo basado en la producción de enzimas. A nivel genético, se utilizaron los genes 16S ARNr y *gyrB* para clasificar las cepas en dos grupos. El primero mostró una similitud del 95% con la especie *S. hyderabadensis*; mientras que, el segundo mostró una similitud del 95% con la especie *S. griseoincarnatus*. El proceso de lixiviación se llevó a cabo en condiciones de pH 5, 5% de NaCl y 28°C, que se encontraron durante los ensayos de crecimiento. Todas las cepas produjeron sideróforos y redujeron el ión férrico, pero no lo oxidaron. A pesar de presentar mecanismos involucrados en el proceso de lixiviación, las cepas no lograron disolver el arsénico en una proporción mayor que el control.

Alvarez (2017) en su investigación evaluó el proceso de biooxidación de concentrados arsenopiríticos utilizando cepas de acidófilos puros compatibles con *Acidithiobacillus ferrooxidans* y el consorcio *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *thiooxidans*. Se realizaron ensayos en reactores discontinuos con porcentajes de sólidos del 8% y 12% para cada prueba, respectivamente. Los microorganismos fueron previamente adaptados al mineral y se utilizaron dos tamaños de partícula, pasante por la malla Tyler 200 (-75 μm). El concentrado arsenopirítico se procesó tanto con pretratamiento como sin tratamiento con cianuro, con el objetivo de

reducir el consumo de reactivos y evaluar la recuperación de oro. Los resultados indican que el sistema del consorcio *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *thiooxidans*, con un porcentaje de sólidos del 8%, logró la máxima oxidación y, por lo tanto, la mayor recuperación de oro del concentrado después de 10 días de operación continua. Se alcanzó una concentración de hierro férrico en solución de 9 g/L, correspondiente a un porcentaje de extracción de oro de hasta el 91.3%.

López y Martínez (2017) llevaron a cabo un estudio para analizar la influencia de la granulometría y la temperatura durante la biooxidación como pretratamiento en la recuperación de oro por cianuración de un mineral refractario de la empresa minera "Rio Chicama". Se utilizó un concentrado de pirita aurífera de 40,5 kg, que fue sometido a 27 pruebas con diferentes tamaños de partícula (37 μm , 53 μm y 74 μm) y tres temperaturas de biooxidación (25 °C, 45 °C y 65 °C). Los resultados obtenidos se utilizaron para realizar un balance metalúrgico y calcular el porcentaje de recuperación de oro. Se encontró que las mayores recuperaciones de oro se obtuvieron con un tamaño de partícula de 37 μm (27,31%) y una temperatura de 25 °C (24,71%). Se concluyó que a medida que disminuye la granulometría y se mantiene una temperatura de 25 °C, aumenta el porcentaje de recuperación de oro, alcanzando un valor máximo del 28,33%. Sin embargo, según el análisis de varianza (ANOVA), se determinó que la temperatura y la interacción entre temperatura y granulometría no tienen una influencia significativa en la recuperación de oro.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. *Recuperación de oro del mineral arsenopirita por cianuración en pilas*

La recuperación de oro del mineral arsenopirita en minas artesanales de Colcabamba se basa en los principios de la cianuración y la lixiviación en pilas. Estos métodos son ampliamente utilizados en la industria minera para extraer el oro de minerales. La cianuración es un proceso químico en el cual se utiliza el cianuro como agente lixivante para disolver el oro presente en el mineral. Este compuesto molecular forma complejos estables con el oro, permitiendo su solubilización en soluciones cianuradas alcalinas diluidas. La ecuación de Elsner, mencionada anteriormente, muestra la reacción química en la cual el oro es disuelto por el cianuro. En el caso específico de la arsenopirita, se trata de un mineral que contiene oro en forma de trazas, junto con arsénico y otros elementos. Para extraer el oro de este mineral se lleva a cabo un proceso de lixiviación en pilas. En este proceso, el mineral es triturado y apilado en grandes pilas al aire libre, luego se rocía una solución cianurada sobre el mineral que disuelve el oro presente en la arsenopirita. La solución es recolectada en la base de la pila y luego sometida a procesos de recuperación, como la adsorción en carbón activado o la precipitación con zinc, para obtener el oro en forma concentrada.

El carbón activado es particularmente utilizado debido a su alta capacidad de adsorción del oro y la plata desde soluciones cianuradas. Es importante destacar que la operación de las pilas de lixiviación requiere un cuidadoso control de parámetros como la concentración de cianuro, pH, tamaño de partícula del mineral y tiempo de lixiviación, entre otros, para optimizar su recuperación y minimizar los impactos ambientales. En resumen, la recuperación de esta mineral del arsenopirita

por cianuración en pilas en minas artesanales de Colcabamba se basa en la disolución mediante cianuro en una solución alcalina. La lixiviación en pilas es utilizada para tratar el mineral triturado, permitiendo que el cianuro disuelva el oro presente en la arsenopirita. Posteriormente, se lleva a cabo la recuperación a partir de la solución lixiviada (Open AI, 2023).

2.2.2. Mineral de oro

Es considerado como símbolo de riqueza desde tiempos antiguos, es dúctil, maleable y de mayor empleo en la joyería, además es muy resistente a los ácidos. El oro se encuentra en filones hidrotermales cuarzosos de elevada temperatura asociada con pirita y arsenopirita (yacimiento primario) y como yacimiento secundario en placeres depósitos de gravas y arenas procedentes de la erosión de los yacimientos primarios. (<https://www.asturnatura.com/>, 1982).

2.2.3. Minerales refractarios

Son minerales de pirita o arsenopirita con contenido de oro, del cual no se puede recuperar este mineral por concentración gravimétrica básica o lixiviación simple, su extracción de oro por medio de procesos de cianuración alcanza el 75% de recuperación, debido a la presencia de compuestos que inhiben la reacción y se consideran refractarios a la cianuración por las siguientes causas: la naturaleza del mineral portador de oro, de los minerales asociados, presencia de materia carbonosa, formación de películas superficiales, presencia de oro ocluido dentro de la ganga de silicatos y de oro ultrafino asociado a menas sulfurosas.

Cualquier factor indicado influyen que un mineral aurífero tenga carácter refractario a la cianuración, el mineral ultrafino es de mayor predominio en los minerales refractarios, porque el oro se encuentra dentro de sulfuros metálicos

como inclusiones inferiores a 0.1 micras o químicamente combinada a la estructura cristalina de los sulfuros (<https://www.asturnatura.com/>, 1982).

2.2.4. Cianuración del oro

La cianuración es un proceso ampliamente utilizado en el tratamiento de minerales de oro desde hace mucho tiempo. Se basa en la capacidad de disolver el oro nativo, la plata y diversas aleaciones de estos metales en soluciones cianuradas alcalinas diluidas. Esta reacción se rige por la ecuación de ELSNER: $4 \text{ Au} + 8 \text{ CNNa} + \text{O}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 4 (\text{CN})_2 \text{ Na Au} + 4 \text{ HONa}$.

Gutiérrez (2017) sostiene que existen dos variantes principales de lixiviación utilizadas en la cianuración: la lixiviación por agitación y por percolación. La primera implica la mezcla intensiva de la mina de oro con una solución cianurada en un reactor, promoviendo la disolución del mineral y su posterior recuperación. La segunda, por otro lado, consiste en la aplicación de la solución cianurada a través de la mina de oro contenida en un lecho, permitiendo que la solución se infiltre y disuelva el oro a medida que fluye a través de ella.

2.2.5. Química de la cianuración

El proceso de cianuración para la extracción del oro y plata de sus menas fue desarrollado por J.S. MacArthur, R.V Forrest y W. Forrest en el año 1887, siendo Elsner quien propuso la reacción química de disolución del oro por cianuros alcalinos.



Observando la importancia del oxígeno para la disolución del oro Bodlaender propuso la reacción siguiente fórmula:



Janin sugirió la siguiente reacción:



Termodinámicamente no es posible esta reacción, “durante la cianuración no hay producción de H_2 , lo que confirma la validez de la ecuación propuesta por Elsner, donde el O_2 juega un rol fundamental” (Chahuayo, 2012, p. 29).

2.2.6. Propiedades físicas del oro

El oro es un metal brillante de color amarillo que refleja la luz. Es el metal más maleable y dúctil. En su estado puro, es demasiado blando para ser utilizado en joyería y acuñación de monedas, por lo que se alea con plata o cobre. Tiene un punto de fusión de 1336 K (1063 °C) y un punto de ebullición de 3129 K (2856 °C). El oro tiene un número atómico de 79 y un peso atómico de 197,2. Su densidad es de 19,3 g/ml. La conductividad térmica del oro es de 103 J/cm s °C y eléctrica es menor que de la plata. Este metal forma aleaciones con plata, cobre, paladio y otros metales, y la cantidad de oro en estas aleaciones se expresa en quilates (Gutiérrez, 2017).

2.2.7. Adsorción con carbón activado

Los carbones activados son ampliamente utilizados en la industria debido a su alta capacidad de adsorción del oro y la plata desde soluciones cianuradas. Estos carbones se caracterizan por tener una estructura granular con una superficie específica muy grande. Entre los diferentes tipos de carbón activado, aquellos fabricados a partir de la corteza del coco, son los más preferidos debido a su resistencia y mayor capacidad de adsorción en comparación con otros materiales.

En el proceso de adsorción, las soluciones provenientes de las pilas de lixiviación pasan a través de columnas que contienen carbón activado. Estas son

periódicamente rotadas para aprovechar al máximo la capacidad de adsorción del carbón. La alimentación de las columnas se realiza en contracorriente para mantener las partículas de carbón en suspensión y evitar la compactación del lecho. La cantidad de oro que puede ser adsorbida por el carbón depende de la concentración de cianuro libre en la solución, las impurezas presentes y el pH, así como del tiempo de contacto o flujo de alimentación. El oro adsorbido en el carbón activado se extrae utilizando una solución alcalina de sulfato de sodio o una solución cianurada caliente. Posteriormente, el oro contenido en esta solución puede ser recuperado mediante electrólisis y sometido a un proceso de refinado para su purificación. El carbón activado descargado se somete a un proceso de reactivación para eliminar los carbonatos y la sílice presente. Este proceso incluye el lavado con solución de ácido nítrico diluido en caliente y soda cáustica, seguido de una etapa de reactivación en un horno a temperaturas elevadas y en una atmósfera pobre en oxígeno para eliminar las materias orgánicas contaminantes sin causar combustión (Gutiérrez, 2017).

2.2.8. Lixiviación en pilas (*Heap Leaching*)

La lixiviación en pilas, también conocida como "Heap Leaching" en inglés, es un proceso metalúrgico utilizado para extraer metales valiosos, como el oro, la plata, el cobre y el uranio de minerales de baja ley. Consiste en apilar grandes cantidades de mineral triturado en forma de montón o pila sobre una base impermeable. Luego, se rocía una solución química, conocida como lixivante, sobre el montón de mineral para disolver los metales de interés.

El lixivante puede ser una solución de ácido sulfúrico, cianuro o ácido clorhídrico, dependiendo del metal que se esté extrayendo. La solución lixivante

percola a través de la pila de mineral y disuelve los metales valiosos, formando una solución cargada con los metales disueltos, también conocida como "lixiviado".

El lixiviado se recoge en la base de la pila y se canaliza hacia una planta de procesamiento, donde se realiza la extracción de los metales mediante diversos métodos, como la precipitación, la adsorción o la electrólisis. Una vez recuperados los metales se obtiene un producto final que puede ser refinado y comercializado.

La lixiviación en pilas es un método ampliamente utilizado en la industria minera debido a su bajo costo y eficiencia en la extracción de metales de minerales de baja ley. Sin embargo, también plantea desafíos ambientales, pues la solución lixivante puede contener sustancias tóxicas que deben ser manejadas y tratadas adecuadamente para evitar la contaminación del suelo y las aguas subterráneas (Open AI, 2023).

2.2.9. Factores influyentes en la velocidad de disolución del oro en minerales auríferos en el proceso de cianuración en pilas de lixiviación

Los factores influyentes en la velocidad de disolución del oro en minerales auríferos durante el proceso de cianuración en pilas de lixiviación son varios y pueden incluir los siguientes:

Granulometría del mineral. El tamaño de las partículas de mineral puede afectar la velocidad de disolución del oro. En general, una mayor área de superficie expuesta facilita la reacción de cianuración y acelera la disolución del metal. Por lo tanto, la trituración del mineral a un tamaño adecuado puede aumentar la velocidad de disolución.

Concentración de cianuro. La concentración de cianuro en la solución lixivante es un factor crítico que afecta la velocidad de disolución del oro. Un aumento en la

concentración de cianuro puede acelerar la reacción de cianuración y aumentar la velocidad de disolución. Sin embargo, es importante mantener la concentración dentro de rangos seguros para evitar riesgos ambientales y de salud.

pH de la solución. El pH de la solución lixivante también influye en la velocidad de disolución del oro. Generalmente, se prefiere un pH alcalino (entre 10 y 11) para promover la cianuración eficiente del oro. Un pH adecuado ayuda a mantener la estabilidad de la especie de cianuro responsable de la disolución del oro.

Concentración de oxígeno. La presencia de oxígeno en la solución lixivante es esencial para que se produzca la reacción de cianuración y se disuelva el oro. Un nivel adecuado de oxígeno disuelto en la solución es necesario para mantener una velocidad de disolución óptima. La agitación o aireación de la solución puede ayudar a aumentar la concentración de oxígeno.

Composición mineralógica. La composición mineralógica del mineral aurífero puede influir en la velocidad de disolución del oro. Algunos minerales asociados pueden tener efectos inhibitorios o catalíticos en la reacción de cianuración. Además, la presencia de minerales refractarios puede disminuir la velocidad de disolución y requerir tratamientos adicionales (Open AI, 2023).

2.2.10. Flotación

La flotación en espuma, es un método fisicoquímico de concentración de minerales finalmente molidos, que aprovecha la diferencia entre las propiedades superficiales o interfaciales del mineral útil y la ganga. El proceso comprende el tratamiento químico de una pulpa de mineral a fin de crear condiciones favorables para la anexión de ciertas partículas minerales a las burbujas de aire. Estas burbujas de aire llevan consigo los minerales seleccionados a la superficie de la pulpa y

forma una espuma estabilizada que es recogida, mientras que, los otros minerales permanecen sumergidos en la pulpa y constituyen las colas o relaves. Tomar la forma esférica o de gota y a las pequeñas masas de aire en el agua a adquirir forma esferoidal y convertirse en burbujas, ya que la esfera es el cuerpo que ofrece el mínimo de superficie por unidad de volumen. La tensión interfacial puede medirse como la fuerza de resistencia que se opone a la ampliación o agrandamiento de la superficie. Su valor queda determinado por el ángulo formado entre las superficies, el cual debe ser igual a cero. Si una de las fases es un sólido y las otras dos fases son fluidos, el equilibrio de fuerzas paralelas a la superficie del sólido conduce a la igualdad (Gutiérrez, 2017).

2.2.11. Flotabilidad del oro

La flotación se utiliza ampliamente para la recuperación del oro y está documentada en la literatura. El mineral se puede clasificar en tres categorías principales: oro libre, minerales de oro y minerales asociados al oro. El libre incluye el oro aluvial (tipo placer), nativo y aleaciones con otros metales como la electrum (Au, Ag), auroestibita (AuSb_2), auricuprita (AuCu_3) y maldonita (Au_2Bi). Este tipo es visible a simple vista y tiene un tamaño típicamente mayor a $0,1 \mu\text{m}$. El término GRG (oro recuperable por gravedad) se utiliza para clasificar este tipo en particular y se refiere a su capacidad de ser recuperado mediante métodos gravimétricos. Los minerales de oro, por otro lado, son aquellos que contienen cantidades significativas en su estructura, como la calaverita (AuTe_2), montbragita (Au_2Te_3), krennerita ($(\text{Au}, \text{Ag})\text{Te}_2$), petzita (Ag_3AuTe_2) y sylvanita (AgAuTe_4).

Por último, los minerales asociados al oro son aquellos que contienen trazas en forma de solución sólida o encapsulado en su estructura. Este oro a menudo se

le llama invisible. Algunos ejemplos de estos minerales incluyen la pirrotita (Fe_7S_8), pirita (FeS_2), calcopirita (CuFeS_2), arsenopirita (FeAsS), tetraedrita-tenantita ($\text{Cu}_{12}(\text{Sb,As})_4\text{S}_{13}$) y bornita (Cu_5FeS_4). El oro libre es naturalmente hidrofóbico, lo que significa que tiene afinidad por el aire y tiende a flotar debido a su carácter no polar. Por otro lado, los minerales de oro y los minerales asociados al oro requieren de procesos de flotación más complejos debido a su composición química. (Gutiérrez, 2017).

2.3. Definición de términos

Cal. Se refiere al óxido de calcio, con una pureza que en promedio supera el 54% de CaO , que se utiliza en el proceso de cianuración. Su función es elevar el pH de la solución por encima de 10, lo cual ayuda a mantener el ion cianuro en solución y reducir la generación de gas cianhídrico. (Llanos, 2019).

Cianuración Se trata del proceso mediante el cual se consigue la disolución del oro y la plata utilizando una solución alcalina de cianuro de sodio. (Llanos, 2019).

Cianuro de sodio Se refiere a una sal que se disuelve en agua y se utiliza en el proceso de cianuración para disolver el oro contenido en el mineral. Además, se emplea en el proceso de cementación para precipitar el oro sobre el zinc (Llanos, 2019).

Dore Se trata de la amalgamación de metales, específicamente oro y plata, mediante su unión química (Llanos, 2019).

Información composicional Es importante tener conocimiento de los minerales con los que el elemento deseado está asociado antes de realizar el proceso de beneficio (Mendoza, 2023).

Ley La presencia del metal valioso se refiere a la cantidad de dicho metal contenido en cada tonelada de mineral. Para los metales preciosos, esta cantidad se expresa en onzas troy por tonelada, mientras que para otros metales o no metales se expresa como un porcentaje. La ley del mineral indica la concentración del metal valioso en partes por millón (ppm) o partes por billón (ppb) (Llanos, 2019).

Lixiviación El proceso de lixiviación implica la disolución de un sólido en una solución solvente (Llanos, 2019).

Microscopía de luz reflejada (opacos) La aplicación de la flotación se enfoca en minerales que, debido a su respuesta a la luz, pueden ser clasificados como minerales opacos. Muchos de estos minerales pertenecen al grupo de los sulfuros y sulfosales (Mendoza, 2023).

Microscopía electrónica de barrido Este método se fundamenta en el uso del nivel de luminosidad de una imagen electrónica generada por los rayos X emitidos por los minerales en el campo de observación (Mendoza, 2023).

Microscopía óptica Consiste en la identificación que se basa principalmente en la observación y, en algunos casos, en la medición de las propiedades de una imagen generada por ondas electromagnéticas dentro del espectro visible (Mendoza, 2023).

Mineral Se trata de una sustancia natural homogénea con propiedades físicas y composición química bien definidas. Si se forma en condiciones favorables, adquiere una forma de cristal específica (Llanos, 2019).

Minerales polisulfuros Se refiere a los minerales que tienen en su estructura la presencia de iones azufre y están enlazados con más de dos elementos químicos (Mendoza, 2023).

Molienda El proceso de molienda implica la reducción del mineral de rocas con un tamaño de $-3/4''$ a un tamaño más pequeño de acuerdo con los requisitos del proceso siguiente. La molienda tiene como objetivo liberar las especies minerales valiosas de la ganga (Llanos, 2019).

Pretratamiento Se trata de procesos fisicoquímicos previos que tienen como objetivo preparar el mineral para una disolución posterior del elemento valioso (Mendoza, 2023).

Pulpa Se refiere a la combinación de un conjunto de partículas pequeñas de un material sólido de mena con agua (Llanos, 2019).

Recuperación El porcentaje de recuperación del metal valioso en el mineral se refiere a la cantidad del metal que se recupera mediante el tratamiento metalúrgico (Llanos, 2019).

Relave El material estéril se obtiene como resultado del proceso de cianuración y adsorción con carbón activado de los minerales (Llanos, 2019).

Solución barren La solución pobre, también conocida como solución de baja concentración de oro, recircula durante el proceso al añadirle cianuro de sodio debido a su bajo contenido de oro (Llanos, 2019).

Solución preñada: La solución rica, también conocida como solución de alta concentración de oro, se obtiene como resultado del proceso de cianuración. Una vez obtenida, se filtra para luego añadirle carbón activado, el cual absorberá las partículas de oro disueltas presentes en dicha solución (Llanos, 2019).

2.4. Hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

La cianuración en pilas es un método viable para la recuperación exitosa de oro de la arsenopirita en Colcabamba - 2017.

Hipótesis nula.

La cianuración en pilas **NO** es un método viable para la recuperación exitosa de oro de la arsenopirita en Colcabamba - 2017.

2.4.2. Hipótesis específicas

Si se determinan las propiedades mineralógicas y composición química de los minerales de arsenopirita con alto contenido de oro, se podrá identificar la presencia de elementos asociados que afecten su recuperación.

Si se desarrollan pruebas de cianuración en pilas específicas para los minerales de arsenopirita, se podrá evaluar la eficiencia de recuperación de oro en las condiciones de Colcabamba.

Si se calculan los costos totales de la cianuración en pilas para la recuperación de oro de los minerales de arsenopirita en Colcabamba, se podrá determinar su viabilidad económica.

2.5. Variables

2.5.1. Variable independiente

Recuperación de oro del mineral arsenopirita.

2.5.2. Variable dependiente

Cianuración en pilas.

2.5.3. Operacionalización de variables

Tipo de variable	Nombre de la variable	Dimensiones	Indicadores
Variable Independiente	Recuperación de oro del mineral arsenopirita.	Dimensión económica.	<ul style="list-style-type: none"> • Costo de extracción y recuperación del oro. • Valor económico del oro recuperado. • Rentabilidad de la operación de recuperación.
		Dimensión técnica.	<ul style="list-style-type: none"> • Efectividad de los métodos y procesos utilizados en la recuperación.
		Dimensión ambiental.	<ul style="list-style-type: none"> • Impacto ambiental de los procesos de extracción y recuperación. • Eficiencia en el manejo y disposición de los residuos y efluentes generados.
Variable dependiente	Cianuración en pilas.	Características del mineral.	<ul style="list-style-type: none"> • Densidad de la roca. • Densidad aparente del mineral. • Granulometría.
		Prueba de lixiviación.	<ul style="list-style-type: none"> • Recuperación del Au.
		Pruebas metalúrgicas por flotación	<ul style="list-style-type: none"> • Recuperación del Au.
		Costos.	<ul style="list-style-type: none"> • Costo de implementación y operación de la cianuración en pilas.

Capítulo III

METODOLOGÍA

3.1 Tipo de investigación

Aplicada, debido a que la investigación está orientada en la búsqueda de resultados y se procurará a la solución del problema mediante aportes teóricos, así mismo la determinación del modelo adecuado de cianuración de oro en pilas.

3.1.1 Nivel

Descriptivo, debido a que condiciona la descripción del método de recuperación del oro.

3.2 Diseño

La investigación es no experimental - transversal.

3.3 Población y muestra

La población comprende las diferentes minas artesanales de oro del departamento de Ancash, mientras la muestra está compuesta por las tres (3) minas artesanales que son: Chapapunta y San Francisco, de la zona de Colcabamba.

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

1. Análisis documental de minas artesanales.
2. Observación de diferentes minas artesanales.
3. Muestreo sistemático de las unidades mineras.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

4. Análisis documental de mineros artesanales.
5. Observación de diferentes minas artesanales.
6. Muestreo sistemático de las unidades mineras.

3.5. Plan de procesamiento y análisis estadístico de datos

Análisis sistemático de los resultados de la investigación que se obtienen, mediante el uso del programa Excel, tablas, cálculos y graficas.

Capítulo IV

RESULTADOS y DISCUSIÓN

4.1. Presentación de Resultados

4.1.1. Prueba Metalúrgica de lixiviación

Con el objetivo de recuperar el oro por cianuración en pilas de minas artesanales de Colcabamba de los yacimientos de mina Chapapunta y mina San Francisco, en un primer momento se realizó los muestreos respectivos para identificar las variables que influyen en la extracción Au en el proceso de lixiviación a nivel de laboratorio de las muestras indicadas, mediante el control adecuado de la granulometría, consumo de reactivos, tiempo de extracción de Au y otros variables.

4.1.2. Estudio granulométrico

Para realizar el estudio granulométrico de las muestras por distribución de tamaños del mineral fragmentado de cada mina se determinó mediante el P80. El resultado fue que el 80% de las partículas que pasaron por las respectivas mallas, como se observa en la tabla 1.

Tabla 1*Granulometría mineral, mina Chapapunta*

Características del mineral				Valor	Unidades
Densidad de roca				2,10	t/m ³
Densidad aparente del mineral				1,25	t/m ³
Malla	Abertur	Pes	% Peso	% Peso	% Peso
s	a (mm)	o Kg	retenido	Acum.(retenido)	Acum.
					(pasante)
4"	101,60	2,50	11,47	11,47	88,53
2"	50,80	3,40	15,60	27,06	72,94
1"	25,40	4,20	19,27	46,33	53,67
¼"	6,35	5,10	23,39	69,72	30,28
-¼"		6,60	30,28	100,00	0,00
TOTAL		21.80	100.00		

Nota. Datos obtenidos del estudio granulométrico.**Tabla 2***Granulometría mineral, mina San Francisco*

Características del mineral				Valor	Unidades
Densidad de roca				2,40	t/m ³
Densidad aparente del mineral				1,35	t/m ³
Abertura	Peso	% Peso	% Peso Acum.	% Peso Acum.	
Mallas	(mm)	Kg	retenido	(retenido)	(pasante)
4"	101,60	1,80	14,40	14,40	85,60
2"	50,80	2,10	16,80	31,20	68,80

1"	25,40	2,20	17,60	48,80	51,20
¼"	6,35	3,00	24,00	72,80	27,20
-¼"		3,40	27,20	100,00	0,00
TOTAL		12.50	100.00		

Nota. Datos obtenidos del estudio granulométrico.

4.1.3. Prueba de lixiviación

La prueba de lixiviación consistió en la máxima recuperación del Au, a partir de cada uno de los minerales de las minas indicadas, controlando los variables del proceso en reactivos, tiempo y la cianurabilidad y el pH del medio, bajo las siguientes condiciones establecidas.

Tabla 3

Condiciones para la prueba de lixiviación mina Chapapunta

Condiciones de operación	
Prueba en botella	Botella
Granulometría	100% - ½"
Ley cabeza	0.098 Onz/Tc(Au)
Densidad aparente	1.45 tn/m ³
NaCN	Variable
pH	10,50 - 11
Dilución (L/S)	2,35
Peso de muestra	850 gr
Volumen de agua	2000 cc
Tiempo	72 hrs.
Agitación	Rodillo

Tabla 4

Prueba de lixiviación en botella con NaCN del mineral de mina Chapapunta

Código	Alteración	NaCN (ppm)	Extracción de Au (%)			Consumo de reactivos	
			Analizada	Calculada	Promedio	NaCN (Kg/tn)	CaO (Kg/tn)
LMB-P-12	Chapapunta	150	85,12	83,50	84,31	0,30	1,15
LMB-P-12	Chapapunta	250	88,60	85,30	86,95	0,35	1,04
LMB-P-12	Chapapunta	350	89,40	89,30	89,35	0,40	0,98
LMB-P-12	Chapapunta	450	90,12	90,10	90,11	0,45	0,86
LMB-P-12	Chapapunta	550	90,16	90,36	90,26	0,50	0,75

Nota. Datos obtenidos de la prueba de lixiviación.

Las concentraciones mayores a 350 ppm de NaCN en el proceso de lixiviación (cianuración) de mineral arsenopirita de la mina Chapapunta presenta incremento mínimo en la extracción de Au, lo que hizo referencia desde una evaluación técnica-económica, que el máximo consumo del NaCN en la prueba metalúrgica no presta mayor importancia por el incremento de consumo de reactivos, siendo así fue establecido que para el consumo en las pilas de lixiviación la concentración del NaCN en la solución lixiviante promedio fue de 350 ppm.

Tabla 5*Condiciones para la prueba de lixiviación mina San Francisco.*

Condiciones de operación	
Prueba en botella	Botella
Granulometría	100% - ½”
Ley cabeza	0.033 Onz/Tc(Au)
Densidad aparente	1.35 tn/m ³
NaCN	Variable
pH	10,50 - 11
Dilución (L/S)	2,35
Peso de muestra	850 gr
Volumen de agua	2000 cc
Tiempo	72 hrs.
Agitación	Rodillo

Tabla 6*Prueba de lixiviación en botella con NaCN del mineral de mina Chapapunta*

Código	Alteración	NaCN (ppm)	Extracción de Au (%)			Consumo de reactivos	
			Analizada	Calculada	Promedio	NaCN (Kg/tn)	CaO (Kg/tn)
LMB-P-14	San Francisco	150	86.16	84.60	85,38	0,30	1,15
LMB-P-14	San Francisco	250	89.20	86.20	87,70	0,35	1,04
LMB-P-14	San Francisco	350	89.90	89.90	89,90	0,40	0,98
LMB-P-14	San Francisco	450	90.40	90.30	90,35	0,45	0,86
LMB-P-14	San Francisco	550	90.45	90.66	90,56	0,50	0,75

Nota. Datos obtenidos de la prueba de lixiviación.

Las concentraciones mayores a 350 ppm de NaCN en el proceso de lixiviación (cianuración) de mineral arsenopirita de la mina San Francisco presento incremento mínimo en las extracción de Au, lo que nos hizo referencia desde una evaluación técnica-económica, que el máximo consumo del NaCN en la prueba metalúrgica no presta mayor importancia por el incremento de consumo de reactivos, siendo así fue establecido que para el consumo en las pilas de lixiviación la concentración del NaCN en la solución lixivante promedio fue de 350 ppm.

4.1.4. Pruebas metalúrgicas por flotación

A fin de realizar una evaluación de la recuperación del Au de los minerales de arsenopirita y óxidos de la zona de Colcabamba se realizó pruebas metalúrgicas por el método de flotación, cuyos resultados se detallan en los siguientes balances metalúrgicos:

Tabla 7

Balance de prueba metalúrgico - mina Chapapunta

PRODUCTO	Gr.	LEY	CONTENIDO METALICO	%	RATIO
		Onz/Tc (Au)	Au	DISTRIBUCION Au	
Cabeza	1000	0,098	98,00	100	
Concent. Au	10.15	32,28	327,64	92,20	98,2
Rela. general	989,85	0,028	27,72	7,80	

Tabla 8

Balance de prueba metalúrgico - mina San Francisco

PRODUCTO	Gr.	LEY	CONTENIDO METÁLICO	%	RATIO
		Onz/Tc (Au)	Au	DISTRIBUCIÓN Au	
Cabeza	1000	0,033	33,00	100	
Concent. Au	9,10	0,116	1,06	7,07	109,89
Rela. general	990,9	0,014	13,87	92,93	

De las pruebas metalúrgicas por el método de flotación se puede analizar que los minerales arsenopirita explotados por los mineros artesanales de Colcabamba, también se pueden recuperar y llegar hasta 92,20 % de oro, si estos minerales tienen la presencia de sulfuros metálicos en el oro. Lo que se demuestra con la prueba metalúrgica de la mina Chapapunta, pues según el análisis de laboratorio tiene As = 3,62%, Sb= 0,20% y Fe = 7,24%; mientras tanto, en las pruebas metalúrgicas de la mina San Francisco alcanzó el 7,07% de recuperación con el reporte de leyes de contaminantes de As = 0,58%, Sb = 0,01%, Fe = 0,63%.

4.2. Prueba de hipótesis

De acuerdo con las pruebas metalúrgicas realizadas, se puede afirmar que es posible la recuperación del oro a partir de los minerales arsenopiritas que son procedentes de las minas artesanales de Colcabamba. En la mina Chapapunta se llega a una recuperación de 89.35% en promedio. Asimismo, en el yacimiento San Francisco es de 89.90%. Hasta la fecha los pequeños mineros vienen realizando la extracción de mineral de las diferentes labores y venden solo como brosa (bruto), a las empresas acopiadoras que se encuentran en el sur del país, y en algunos casos a la planta Paltarumi, ubicado en el Km. 222.5 de la Panamericana Norte (Barranca).

4.3. Discusión

Se demostró que es posible la recuperación del oro a partir de los minerales de arsenopirita por cianuración, mediante los muestreos y análisis del mineral en los laboratorios. Asimismo, se debe precisar que no todos los minerales de arsenopirita de la zona de Colcabamba contienen oro de alta ley; a su vez que el método de recuperación con NaCN y cal es adecuado para aquellos que no tienen contenidos de sulfuros y otros cianicidas. Por otro lado, los que contienen As, Fe y

otros sulfuros es adecuada la recuperación por el método de flotación, según las pruebas metalúrgicas de lixiviación y flotación presentados en los resultados.

Según Huamani et al. (2019) el resultado del proceso de cianuración con sales llega a 97.78% durante 24 horas, sin sales con tratamiento convencional a 84.50%; y en otro experimento alcanzó el 93% de recuperación durante el mismo tiempo.

Bazan et al. (s.f), manifiestan que con los minerales refractarios no es posible de recuperar el oro por lixiviación más del 75%, toda vez que se encuentra encapsulado en arsenopirita, pirita y material carbonáceo.

Alvarez et al. (2015) realizaron pretratamiento de concentrados de sulfuros metálicos de oro, con peróxido de hidrógeno y ácido nítrico a minerales refractarios del mismo mineral y mediante pruebas experimentales de lixiviación llegaron a más del 98%.

Según Mamani (2019) el proceso de cianuración de 2.40 gr / tn de oro, con pH de 11, solución de CaO al 15%, granulométrica de malla – 200, 32.56% de sólidos y temperatura ambiente de 16°C, en 72 hrs, recuperó el 91,67% en prueba M1 y 90,42% del mineral en prueba M2, con cianuro libre de 0,14% a 0,08% de CN^- .

Es preciso tener en cuenta que el costo-beneficio del proceso de lixiviación del mineral arsenopirita es aceptable, porque es factible instalar una planta de lixiviación en lugar cercano a las minas y evitar mayores costos de transporte a otros lugares; cabe mencionar que se tuvo como limitante en la infraestructura para realizar pruebas de lixiviación en pilas, solo se realizó en botellas.

Los resultados de la investigación pueden ser útiles a otras empresas mineras dedicadas a la extracción de minerales tanto de oro como de arsenopirita, porque

todo el procedimiento y la aplicación de los métodos empleados son resultan eficaces para la explotación de estos minerales por métodos mixtos de lixiviación y flotación.



Conclusiones

1. Es factible la recuperación del oro a partir de los minerales de arsenopirita por lixiviación (cianuración) con NaCN y cal de las minas artesanales de Colcabamba, llegándose a recuperar en Chapapunta el 89.35% y San Francisco 89.90%, 92.30%, con relación a las variables de la investigación.
2. El mineral de arsenopirita que contiene alta ley de oro caracterizado se encuentra en óxidos (jarocita, goethita, turgita, limonita, etc.), cuya ocurrencia de mineralización es filoniana de origen hidrotermal y con alteraciones de cuarzo alunita y cuarzo sericita con presencia constante de argilización, configurándose un sistema de alta sulfuración en medios ácidos.
3. El desarrollo de las pruebas de lixiviación fue de mucha importancia para determinar las condiciones de operación metalúrgica de cada tipo de mineral, resultando que los minerales con mayor presencia de arsénico en el caso de las minas Chapapunta y San Francisco tienen bajas recuperaciones.
4. Los parámetros estándar establecidos para la cianuración son botella damajuana, granulometría 100% - ½", pH (10.5 – 11), muestra 850 gr, volumen de agua 2000 cc, tiempo 72 horas y equipo de rodillo.
5. En cuanto a la determinación de costos para la lixiviación (cianuración) de minerales con contenido de arsenopirita de la zona de no fue determinado con precisión, porque muchos de los trabajos fueron realizados a través de terceros.
6. También se desarrolló pruebas metalúrgicas de flotación a cada muestra de mineral, obteniéndose una recuperación del 92.20% de oro de los minerales con contenido de (arsénico=3.62%), (hierro=7.24%) en el caso del mineral de mina la Chapapunta; y en San Francisco los resultados demuestran que

contiene bajas cantidades de As y Fe, por lo que, la recuperación fue de 7.07% y 33.47% respectivamente.

Recomendaciones

1. Para la recuperación de oro a partir de los minerales que contiene arsenopirita, se desarrolló la prueba de lixiviación en un tiempo determinado de 72 horas; pero es necesario realizar una investigación con tiempos escalonados, hasta agotar la ley de cabeza del mineral y determinar específicamente cual es el tiempo optimo en el consumo de reactivos y establecer otros parámetros que posiblemente no se consideraron en la investigación.
2. Actualmente los costos de los minerales están en alza y tienen un buen precio, especialmente cuando se trata del oro, por lo cual es necesario complementar la investigación con la evaluación de los costos reales, a fin de instalar una planta de cianuración (lixiviación) en pilas in situ, a fin apoyar la extracción del oro a los mineros artesanales de Colcabamba.
3. En vista de que las minas se encuentran en la zona de Colcabamba y allí existen varias zonas agrícolas, es necesario realizar trabajos de responsabilidad social en las comunidades del entorno, a fin de considerar los futuros problemas socioambientales, en caso de instalar una planta de cianuración en la zona.
4. Como profesional en el área de minería, sugiero continuar con la investigación en la recuperación del oro, a partir de los minerales refractario-oxidados y con alto contenido de arcilla, que se encuentran en la región Áncash y otros lugares, a fin de explotar y dar oportunidades laborales a los comuneros de su entorno.
5. Muchos mineros artesanales se encuentran explotando el oro en muy formas precarias desde la mina y no realizan procesamiento metalúrgico de recuperación en la zona, lo cual no es muy rentable, por tal razón es necesario instalar una planta de lixiviación (cianuración) en la región Áncash y así brindar

oportunidades a los mineros artesanales que se dedican a la extracción de minerales de oro.

Referencias bibliográficas

- Alvarez, A.M., Morales, C. S., Tapia A. L., Muñoz, B., G., R., y López F. (2015). *Estudio de la lixiviación de oro refractario en un concentrado gravimétrico de minerales del sector minero de Torata, provincia de El Oro, usando peróxido de hidrógeno y ácido nítrico.*
- Alvarez Cuarite, J. (2017). *Evaluación de la biooxidación de concentrado arsenopirítico aurífero por pretratamiento con bacterias quimiolitotrofas acidófilas que mejoren la recuperación del oro por cianuración en la empresa minera EMINSOL S.A. Bolivia – 2015.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Jorge Basadre Grdhamann].
- Avila Meza, R. (2022). *Diseño y evaluación de un sistema de agitación para el proceso químico -metalúrgico de cianuración del oro.* [Tesis de maestría, Universidad Nacional San Luis Gonzaga].
- Baylón, A. A. (2015). *Aplicación del modelo geológico en la gestión por procesos para la extracción de oro de sulfuros, en las Minas del Perú 2012-2013.* [Tesis de Maestría, Universidad del Altiplano].
- Bazan, V., Lara, R., y Brandalez, E. (s.f). *Caracterización de minerales refractarios de oro Characterization of gold refractory minerals.*
- Carhuamaca Rojas, W. R., y Cristobal Cardenas, B. M. (2013). *Recuperación del oro mediante la pre - aireación en concentrados de oro pirítico en la empresa “Analytica Mineral Services S.A.C” – Chala - Arequipa*. [Tesis de pregrad, Universidad Nacional del Centro del Perú].
- Chahuayo Meza, E. (2012). *Estudio de optimización para mejorar la Lixiviación censurante de un mineral Refractario de oro y plata conteniendo Antimonio*

de la zona de Huampar Lima. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú].

Open AI. (2023). *ChatGPT.* (día, año).[tema].URL

Dueñas Cabrera, Z. A., y Graff Ruiz, J. F. (2018). Recuperacion de oro y plata por medio de concentracion por flotacion y lixiviacion con cianuro. [Tesis de pregrado, Universidad de Sonora].

Enderica Ortega, F. (2023). *Tratamiento de menas auríferas asociadas a minerales de arsénico.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia].

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. [Tesis de pregrado, Universidad ...].

Gutiérrez, 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.* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos].

Hernandez, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2010). *Metodología de la investigación Quinta edición.*

<https://www.asturnatura.com/>. (1982). *mineral/oro/8.html. Mineral and Gem encyclopedia, p.152, .*

Huamaní B, R. P., Suero R, A. F., Hau M, L., y Mamani C., P. L. (2019). Contribución al conocimiento sobre la minimización del consumo de cianuro en la minería del oro; sales oxidantes, aireación y sobremolienda para minerales cianicidas. *Revista Boliviana de Química.*

- Lalvay Toledo; D. (2023). *Recuperación de oro con cianuro sódico y tiourea como agentes lixiviantes, variando fracción de sólidos, concentraciones y tiempo*. [Tesis de pregrado, Universidad Del Azuay].
- Llanos López, L. . (2019). *Tratamiento de minerales refractarios para la extracción de oro a nivel laboratorio*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión].
- López, J. M. y Martínez, C. C. . (2017). *Efecto de la granulometría de un concentrado de pirita aurífera y de la temperatura durante la biooxidación como pretratamiento para incrementar el grado de recuperación de oro por cianuración de un mineral refractario de la empresa minera Rio Chicama*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo].
- Mamani C. V. (2019). *Mamani C. V., estudio del proceso de cianuración de minerales auríferos para la recuperación de oro en el proyecto Oropesa, La Rinconada - Puno*.
- Mamani, C. V. (2019). *Estudio del proceso de cianuración de minerales auríferos para la recuperación de oro en el proyecto oropesa, La Rinconada - Puno*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano].
- Mamani, J. F. (2019). *Influencia de la caracterización geometalúrgica en el proceso de cianuración en pilas de lixiviación de mineral aurífero epitermal de alta sulfuración del yacimiento Ayahuanca*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Huancavelica].
- Mendoza Berrospi, S. (2019). *Caracterización físico química y mineralógico de polisulfuros en la recuperación de oro por cianuración en el prospecto*

- Canteño 2 – Lima, 2019*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión].
- Obando Chávez, M. . (2020). *Lixiviación de arsénico a partir de arsenopirita mediada por Streptomyces*. [Tesis de maestría, Universidad Peruana Cayetano Heredia].
- Oscoco, L. A. (2015). Biolixiviación del cobre en minerales sulfurados refractarios como proceso preliminar para la lixiviación de oro por cianuración. [tesis de pregrado, Universidad ...].
- Palma, R. A. (2019). Lixiviación cianurada de mineral de oro en columnas a nivel de planta piloto.
- Pari, J. C. (2017). Optimización del proceso de flotación para la recuperación de un preconcentrado de oro en minerales sulfurados de la minera colibrí sac. Caravelí-Arequipa. [Tesis de pregrado, Universidad del Altiplano].
- Ticona, D. F. (2019). Evaluación del reactivo goldmax en minerales auríferos refractarios. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Tacna].
- Torres, F., Moreno, O., Tua, A., Rodríguez, G., y Moreno, J. (s.f.). Modelos para la lixiviación en pilas de oro por cianuración. *XIV Jornadas Argentinas de Tratamiento de Minerales*.

Anexos



Anexo 1

Matriz de consistencia

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables	Metodología	Enfoque y Diseño
Formulación del problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable independiente.		Enfoque
¿Cuál es la viabilidad técnica, económica y ambiental de aplicar el método de cianuración en pilas para la recuperación de oro a partir del mineral de arsenopirita en las minas artesanales de Colcabamba durante el año 2017?	Recuperar oro del mineral arsenopirita por cianuración en pilas de minas artesanales de Colcabamba - 2017.	<p>La cianuración en pilas es un método viable para la recuperación exitosa de oro de la arsenopirita en Colcabamba - 2017.</p> <p>Hipótesis nula</p> <p>La cianuración en pilas NO es un método viable para la recuperación exitosa de oro de la arsenopirita en Colcabamba - 2017.</p>	Recuperación de oro del mineral arsenopirita.	<p>Tipo</p> <p>Aplicada.</p> <p>Nivel</p> <p>Descriptivo, debido a que condiciona la descripción del método de recuperación del oro.</p>	<p>El enfoque es cuantitativo, ya que la investigación es objetiva, orientada a resultados.</p> <p>Diseño</p> <p>El diseño de la investigación será de la investigación descriptiva simple.</p> <p>Población o universo</p> <p>La población comprende las diferentes minas artesanales de oro del departamento de Ancash, mientras la muestra está compuesta por las tres (3) minas artesanales que son: Chapapunta y San Francisco, de la zona de Colcabamba.</p>
Formulación de problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis Específicas	Variable dependiente.		
¿Cuáles son las propiedades mineralógicas y composición química de los minerales de arsenopirita con alto contenido de oro?	Determinar las propiedades mineralógicas y la composición química de los minerales de arsenopirita con alto contenido de oro en Colcabamba.	Si se determinan las propiedades mineralógicas y composición química de los minerales de arsenopirita con alto contenido de oro, se podrá identificar la presencia de elementos asociados que afecten su recuperación.	Cianuración en pilas.		

<p>¿Cuál es la eficacia de la cianuración en pilas para extraer el oro de los minerales de arsenopirita en Colcabamba?</p>	<p>Evaluar la eficacia de la cianuración en pilas como método de extracción de oro de los minerales de arsenopirita en Colcabamba.</p>	<p>Si se desarrollan pruebas de cianuración en pilas específicas para los minerales de arsenopirita, se podrá evaluar la eficiencia de recuperación de oro en las condiciones de Colcabamba.</p>			
<p>¿Cuáles son los costos asociados a la implementación de la cianuración en pilas para la recuperación de oro en Colcabamba, considerando los insumos y operaciones necesarias?</p>	<p>Calcular los costos totales involucrados en la implementación de la recuperación de oro del mineral arsenopirita por cianuración en pilas de minas artesanales de Colcabamba</p>	<p>Si se calculan los costos totales de la cianuración en pilas para la recuperación de oro de los minerales de arsenopirita en Colcabamba, se podrá determinar su viabilidad económica.</p>			

ANEXO II: ACRÓNIMOS

p.p.m	: Partes por millón.
%	: Porcentaje.
Oz/TM	: Onza por tonelada métrica.
°C	: Grados centígrados.
Cal/g	: Caloría por gramo.
Mm	: Milímetro.
LIS	: Relación líquido-sólido.
Mi	: Mililitro.
MHm	: Resistencia eléctrica.
A°	: Radio iónico / Radio atómico
t/h	: Toneladas por hora.
m ³ /h	: Metros cúbicos por hora.
μ	: Micra.
G's	: Fuerza de gravedad.
VFD	: Unidad de frecuencia variable.
kg/h	: Kilogramos por hora.
pH	: Potencial de hidrógeno.
“	: Pulgada.
US\$: Dólares Americanos.

kW	: Kilowatts.
H	: Horas
m ²	: Metro cuadrado.
cm ³	: Centímetro cúbico.
Kg	: Kilogramo.
M	: Metro.
TM	: Toneladas métricas.
mg/L	: Miligramo por litro.
G	: Gramo.
cm ²	: Centímetro cuadrado.
g/TM	: Gramos por tonelada metrica
Psi	: Libra por pulgada cuadrada
Min	: Minuto.
g/L	: Gramo por litro
km	: Kilómetro.
mm ²	: Milímetro cuadrado.
mg/cm	: Miligramo por centímetro cuadrado.
Eh	: Potencial rédox.
lb/Oz	: Libra por onza.
Bar	: Unidad de presión.

- ° ' '' : Latitud (grados, minutos, segundos)
- m.s.n.m. : Metros sobre el nivel del mar.
- mg/cm²/h : Miligramo por centímetro cuadrado por hora.
- μm : Micrones. (Gutiérrez, 2017, pp. iv-v).



ANEXO III: PANEL FOTOGRAFICO

Fotografia 1. Vista panoramica de la ubicación de las minas Chapapunta, y San Francisco.



Fuente: Elaboracion propia.

Fotografia 3. Muestreo de mineral mina Chapapunta



Fuente: Elaboracion propia.

Fotografía 3. Mina Chapapunta



Fuente: Elaboracion propia.

Fotografía 4. Muestreo de la mina San Francisco



Fuente: Elaboracion propia.

Fotografia 5.Mina San Francisco



Fuente: Elaboracion propia.