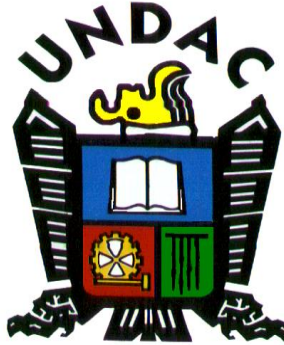


UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



T E S I S

**Caracterización y tratamiento por cianuración de
sulfuros para la recuperación de oro en Quío – Ambo –
Huánuco - 2019**

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Metalurgista

Autor: Bach. Helaman Mijael FERRER GUILLERMO

Asesor: Mg.Eduardo Jesús MAYORCA BALDOCEDA

Cerro de Pasco – Perú – 2019

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



T E S I S

**Caracterización y tratamiento por cianuración de
sulfuros para la recuperación de oro en Quío – Ambo –
Huánuco - 2019**

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Mg, Marco Antonio SURICHAQUI HIDALGO

PRESIDENTE

Mg. Ramiro SIUCE BONIFACIO

MIEMBRO

Mg. Manuel Antonio HUAMAN DE LA CRUZ

MIEMBRO

DEDICATORIA

a dios fundamentalmente
y a mis padres por haberme
dado el regalo más preciado
al igual que la vida mi profesión,
por la cual viviré eternamente
agradecido.

RESUMEN

Esta investigación tuvo como objetivo general determinar el método de explotación a desarrollar; después de tener la certeza de las reservas cubiertas probables de oro y sobre la formación geológica, elaborar el sistema de extracción y procesamiento.

Este estudio se aborda desde el enfoque cuantitativo, del tipo aplicado y un diseño de investigación experimental y tiene cuatro etapas de desarrollo de la investigación del siguiente modo: el primero después de realizar las calicatas para calcular el volumen total de mineralización existentes en afloramiento en la concesión otorgada, se determinó que se presenta alrededor de ocho hectáreas. Las muestras presentan una apreciable cantidad de oro y plata, en minerales sulfurosos como son: galena, esfalerita y pirita principalmente, sin obviar a los minerales refractarios que pudiera existir. En base a estos datos se ha diseñado el sistema de extracción, acarreo procesamiento y cierre de las operaciones.

Se concluyó que en una primera fase se desarrollara pruebas de experimentación, para luego realizar estudios más profundos y llevarlo a pilotaje posteriormente

Palabras clave: Cianuración, sulfuros auríferos, concentración gravimétrica, rentabilidad y desarrollo sostenible.

ABSTRACT

This research had as a general objective to determine the exploitation method to be developed; After having the certainty of probable cubic gold reserves and geological formation, develop the extraction and processing system.

This study is approached from the quantitative approach, of the applied type and an experimental research design and has four stages of research development as follows: the first one after performing the calicatas to calculate the total volume of mineralization existing in outcrop in the concession granted, it was determined that it is presented around eight hectares. The samples present an appreciable amount of gold and silver, in sulphurous minerals such as: galena, sphalerite and pyrite mainly, without forgetting the refractory minerals that may exist. Based on this data, the extraction, hauling, processing and closing operations system has been designed.

It was concluded that experimentation tests will be developed in the first phase, to then carry out deeper studies and then pilot it

Keywords: Cyanidation, gold sulphides, gravimetric concentration, profitability and sustainable development

INTRODUCCIÓN

Una de las funciones básicas de la universidad es la investigación. La generación de conocimiento es una preocupación esencial de las universidades, es su razón de ser. Todos los programas en el mundo proponen un modelo curricular por competencias destinado a la formación del nuevo profesional capaz de resolver problemas sustanciales de la sociedad e innovar el conocimiento.

La tesis es la prueba “de fuego” que demuestra las competencias requeridas para obtener el grado académico. Se espera de ella una evidencia indiscutible de las competencias de investigación aprendidas en las aulas universitarias y se aplique al campo profesional.

El presente proyecto, titulado “*Caracterización y tratamiento por cianuración de sulfuros para la recuperación de oro en Quío – Ambo – Huánuco - 2019*”, es interesante porque se trata de un afloramiento interesante en minerales sulfurosos y que requiere una explotación ecológica y sostenible.

Los estudios desarrollados a través de las calicatas realizadas confirman la presencia de oro en toda la concesión y resulta prometedor para su explotación. Se encuentra dividido en cuatro capítulos; sigue una secuencia lógica propia de los proyectos de investigación, del siguiente modo:

CAPÍTULO I. Se determina la problemática, para formularlo en preguntas, sobre qué método de explotación se diseñará para extraer el oro presente, con las sub preguntas que consisten en el diseño del sistema de

explotación, acarreo del material y procesamiento. Su objetivo está referido a diseñar el método de explotación adecuado, justificando la presente investigación, dada la importancia que significa llevarlo a explotar el yacimiento en forma sostenible.

CAPÍTULO II. Se expone cuatro antecedentes referidos al tema, dos investigaciones nacionales y dos internacionales, plasmados en tesis, seguido de una descripción de las bases teóricas desde una perspectiva general a específica de la deposición del oro en placeres; hasta definir los métodos de cubicación y explotación; se plantea las hipótesis y se define las variables de operación.

CAPÍTULO III. Comprende el método de investigación: experimental; nivel experimental y tipo aplicativo, con diseño experimental, sobre una población de 8 hectáreas y muestreo aleatorio simple; Cubicando la concesión y sobre ello diseñar el método de explotación a seguir.

CAPÍTULO IV. Los cálculos procesados en el capítulo anterior se presentan en tablas y ecuaciones, para luego la hipótesis ser contrastada, demostrándose que el nivel de aceptación de los datos es correcto al no rechazar la hipótesis nula.

CONCLUSIONES. Se concluye que el yacimiento es prometedor; las reservas de oro existentes demostradas en las calicatas desarrolladas y la etapa de concentración por gravimetría sugieren llevar adelante el proyecto.

El autor.

INDICE

DEDICATORIA

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

ÌNDICE

CAPITULO I	155
PROBLEMA DE INVESTIGACIÒN	155
1.1. IDENTIFICACIÒN Y DETERMINACIÒN DEL PROBLEMA	155
1.2. DELIMITACIÒN DE LA INVESTIGACIÒN	177
1.3. FORMULACIÒN DEL PROBLEMA.....	17
1.3.1. Problema general	188
1.3.2. Problemas especìficos.....	188
1.4. FORMULACIÒN DE OBJETIVOS	188
1.4.1. Objetivo general	188
1.4.2. Objetivos especìficos.....	188
1.5. JUSTIFICACIÒN DE LA INVESTIGACIÒN.....	199
1.6. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÒN	199
CAPITULO II	20
MARCO TEÒRICO	20
2.1. ANTECEDENTES DE ESTUDIO	20
Antecedentes nacionales	20

Antecedentes internacionales	21
2.2. BASES TEÓRICAS - CIENTÍFICAS	233
2.2.1. Propiedades del oro	233
2.2.2. Minerales auríferos.....	255
2.2.3. Minerales refractarios	26
2.2.4. Cianuración	377
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	522
2.4. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS	533
2.4.1. Hipótesis general.....	533
2.4.2. Hipótesis específicas.....	533
2.5. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES	533
2.5.1. Variables independientes	533
2.5.2. Variable dependiente.....	543
2.5.3. Variables intervinientes.....	543
2.6. DEFINICIÓN OPERACIONAL DE VARIABLES E INDICADORES	544
CAPÍTULO III	555
METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN.....	555
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	555
3.2. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	555
3.3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	566
3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA	566
3.4.1. Población.....	566

3.4.2.	Muestra	566
3.5.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	577
3.5.1.	Caracterización de la muestra	577
3.5.2.	Pruebas de concentración centrífuga	588
3.5.3.	Pruebas de cianuración	599
3.6.	TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	60
3.6.1.	Caracterización de la muestra	60
3.6.2.	Pruebas de concentración centrífuga	655
3.6.3.	Pruebas de cianuración	688
3.7.	TRATAMIENTO ESTADÍSTICO	69
3.8.	SELECCIÓN, VALIDACIÓN Y CONFIABILIDAD DE LOS INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN	699
3.9.	ORIENTACIÓN ÉTICA	699
CAPÍTULO IV	71
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	71
4.1.	DESCRIPCIÓN DE TRABAJO DE CAMPO.....	71
4.1.1.	Caracterización de la muestra	71
4.1.2.	Pruebas de concentración centrífuga Falcon.....	71
4.1.3.	PRUEBAS DE CIANURACIÓN.....	799
4.2.	PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	82
2		
4.3.	PRUEBA DE HIPÓTESIS.....	833

4.4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	855
4.4.1.	Características de la muestra	855
4.4.2.	Pruebas de concentración centrífuga	888
4.4.3.	Pruebas de cianuración	88
	CONCLUSIONES.....	90
	RECOMENDACIONES.....	911
	BIBLIOGRAFÍA.....	922
	ANEXOS	944

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Solubilidad de especies minerales en cianuración	41
Tabla 2	Composición de muestra	60
Tabla 3	Minerales observados al microscopio	61
Tabla 4	Tipos de entrelazamientos de minerales	62
Tabla 5	Minerales a malla -200	63
Tabla 6	Tipos de entrelazamientos de minerales	65
Tabla 7	Condiciones de operación del concentrador Falcon	66
Tabla 8	Condiciones de operación del concentrador Falcon	67
Tabla 9	Consumo de reactivos y condiciones de operación	68
Tabla 10	Observaciones al microscopio de opacos	71
Tabla 11	Grados de liberación de los minerales a mallas 200	72
Tabla 12	Minerales presentes en la muestra	74
Tabla 13	Grados de liberación de los minerales a mallas 200 después de la molienda	75
Tabla 14	Balance metalúrgico – concentrador Falcon	78
Tabla 15	Balance metalúrgico – concentrador Falcon	78
Tabla 16	Balance metalúrgico de cianuración	79
Tabla 17	Balance metalúrgico de cianuración	79

Tabla 18	Balance metalúrgico de cianuración	80
Tabla 19	Balance metalúrgico de cianuración	80
Tabla 20	Balance metalúrgico de cianuración	81
Tabla 21	Proceso de cianuración	82

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Diagramas de Pourbaix	27
Gráfico 2	Diagramas de estabilidad potencial - pH	48
Gráfico 3	Diagramas de estabilidad potencial - pH	49
Gráfico 4	Ilustración de la naturaleza electroquímica de la disolución de partículas de oro	50
Gráfico 5	Representación esquemática de la disolución de oro	52
Gráfico 6	Cianuración de oro y plata	82

CAPITULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. IDENTIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

En el Perú se encuentran muchos yacimientos auríferos ubicados en ceja de selva aún inexplorados, de los cuales se puede extraer una apreciable cantidad de oro, en determinados lugares extraen los mineros informales y artesanales. El proceso que siguen es: remoción de las arenas y luego es procesado por diversos métodos; el oro es recuperado por métodos gravimétricos y/o mercurio, siendo este elemento el primer contaminante de las playas y ríos de la selva con la consiguiente contaminación de la flora y fauna acuática.

En el distrito de Quío, provincia de Ambo, Huánuco, se encuentra un yacimiento ubicado en la falla Rondoni con una formación de silicatos que en las fallas geológicas contienen sulfuros de plomo, cobre y zinc de baja

ley con contenidos de oro que abarca un área de ocho hectáreas en afloramiento con esta característica, sin explorar, lo cual amerita desarrollar trabajos de prospección geológica y evaluación metalúrgica.

Las primeras evidencias muestran la presencia de oro en la galena.

La rentabilidad de este preciado metal ha conducido a muchos empresarios y ciudadanos de la sierra y selva peruana a extraer en forma desorganizada, destruyendo el ecosistema.

Estos antecedentes han obligado a los gobiernos a tomar medidas correctivas para que el estado sea beneficiario de los impuestos, se realice un trabajo sostenible para preservar la ecología y mejores condiciones de trabajo para el personal y su familia.

La minería artesanal en el Perú explota casi exclusivamente el oro, y se desarrolla principalmente en seis regiones en el país: Madre de Dios, Puno, Ica, Ayacucho, Arequipa y La Libertad. En las regiones de Ica, Ayacucho y Arequipa, la explotación minera artesanal se concentra en el territorio denominado eje Nazca – Ocoña (nombre asignado por el Instituto Geofísico del Perú).

Para el Ministerio de Energía y Minas, la más importante región según volumen de producción es Madre de Dios con el 59% del total de la producción artesanal de oro, Puno ocupa el segundo lugar con 21%, el eje Nazca – Ocoña en tercer lugar con 18% y finalmente La Libertad con 2% sobre el total de la producción aurífera artesanal.

Las regiones en donde se desarrolla la explotación minera artesanal de oro tienen yacimientos de distintas características. En la región de Madre

de Dios, por ejemplo, las operaciones mineras se ubican principalmente en las localidades de la Llanura y el tipo de yacimiento es aluvial principalmente. En el eje Nazca - Ocoña, la mineralogía se desarrolla en filones o vetas de espesor reducido y alta ley. En Puno, existen yacimientos primarios de tipo veta y mantos, y yacimientos secundarios denominados placeres. Finalmente, en La Libertad, los yacimientos son de tipo filoneo o aluviales.

Se tiene afloramiento visible de vetas con una potencia de 1,50 m a 6,0 m y los comuneros desean realizar una alianza estratégica con algún minero para explotar el yacimiento.

Los moradores que viven en las cercanías del paraje fueron informados de las intenciones de la empresa de extraer oro de las arenas existentes y paralelo a la explotación estabilizar el suelo con la siembra de árboles perenes, generando empleos, tributos al estado y recuperación del suelo actualmente devastado.

1.2. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Espacial

El desarrollo del presente trabajo se ejecutará en solo el yacimiento de Quío, por tener la particularidad de su mineralización.

Temporal

El trabajo de investigación comprende un año (enero – diciembre del 2019).

1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.3.1. Problema general

¿Cómo desarrollar la caracterización y tratamiento por cianuración de sulfuros para la recuperación de oro en Quío – Ambo - Huánuco – 2019?

1.3.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es la caracterización mineralógica de los sulfuros en el prospecto minero en Quío – Ambo – Huánuco - 2019?
- ¿De qué manera las variables: densidad de pulpa, Grado de liberación y velocidad de rotación del agitador influye en la recuperación de oro en Quío – Ambo – Huánuco – 2019?

1.4. FORMULACIÓN DE OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo de caracterización y tratamiento por cianuración de sulfuros para la recuperación de oro en Quío – Ambo – Huánuco – 2019.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar y desarrollar el modelo de caracterización mineralógica de los sulfuros en el prospecto minero en Quío – Ambo – Huánuco - 2019.
- Evaluar las variables: densidad de pulpa, Grado de liberación y velocidad de rotación del agitador en la recuperación de oro en Quío – Ambo - Huánuco – 2019.

1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación se justifica porque desarrollando pruebas experimentales que permita un proceso de explotación de oro, con explotación responsable, ausencia de áreas contaminadas, reforestación y buenas relaciones con los pobladores del entorno, permitirá alcanzar los permisos social y ambiental correspondientes y podrá implementarse a nivel industrial.

IMPORTANCIA Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

Es importante el presente proyecto, porque para iniciar un proceso productivo, se debe tomar en consideración la preservación del medio ambiente, el crecimiento económico y sostenible de los pobladores y la tributación.

El alcance del modelo propuesto servirá como ejemplo para las demás empresas que trabajan en escenarios similares reestructuren su proceso productivo y se formalicen como buenos empresarios mineros.

1.6. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

El factor limitante es la falta de laboratorios especializados al alcance de todos, donde se investigaría profundamente la mineralogía.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE ESTUDIO

Antecedentes nacionales

Guerrero, Roberto (2011) en su tesis *“Aplicación de la cianuración dinámica en la recuperación del oro para disminuir tiempos y la cantidad de reactivos empleados en el proceso”* Universidad Nacional San Luis Gonzaga – Ica, concluye; La lixiviación dinámica, llevada a cabo con agitación constante material pulverizado, es un proceso diseñado para recuperar oro en tiempos cortos y con una gran eficiencia; en nuestro caso el tiempo de recuperación del metal se redujo a 120 minutos y la recuperación fue de una eficiencia superior al 99%.

Los parámetros adecuados para llevar a cabo este tipo de proceso son los siguientes:

Relación solución: mineral:	5:1
% de cianuro:	0,075 %
Malla empleada:	- 200 serie Tyler
Velocidad de agitación:	500 rpm
Tiempo:	120 minutos

La cantidad de muestra empleada en los ensayos fue:

Cantidad de mineral ensayado:	500 g
Volumen de solución ácida:	2500 ml
Contenido en oro:	1,25 g

Antecedentes internacionales

Santos, Rocío (2013) en su tesis "*Evaluación de cuatro métodos para recuperación de oro a partir de un mineral refractario*", Instituto Politécnico Nacional de México; tiene por objetivo: Evaluar la eficiencia de cuatro métodos para recuperar oro y plata a partir de un mineral refractario considerando su impacto ambiental, y la factibilidad científica y tecnológica para llevarla a cabo. Y concluye: En cuanto a recuperación de oro se refiere los pretratamientos que resultaron ser más eficaces fueron la biooxidación al 5% y la molienda de alta energía, los dos son procesos alternativos al ya tradicional método de la tostación, ya que ninguno emite contaminación de gases al ambiente, pues la biooxidación mantiene

el arsénico en solución y la molienda ultrafina solo reduce su tamaño de partícula, pero no sufre ninguna reacción química durante la molienda. El consumo de cianuro para la molienda ultrafina resulta ser más baja que la de biolixiviación al 5% y relativamente parecida a la tostación. Por lo que se sugiere realizar un análisis más profundo para saber cuál de los dos resulta ser más viable económicamente.

Gámez, Sebastian (2015) en su tesis "*Diseño de una planta para recuperación de oro a partir de minerales sulfurados con tiosulfato de sodio como agente lixivante*", Escuela Politécnica Nacional – Ecuador, Concluye en:

- La presencia de la cuprotetramina, responsable de catalizar la disolución de oro, se da a valores de pH comprendidos entre 10,0 y 11,0; su beneficio se comprobó en los ensayos realizados a un valor de pH de 10,5 en donde la recuperación de oro fue de 28%, mientras que a un pH de 12,0; la recuperación de oro disminuye a 18%.
- Un excesivo incremento de iones cobre puede desembocar en una baja recuperación de oro en el lixiviado, esto se confirmó en los ensayos realizados a una concentración de cobre de 127 y 381 mg/l en los cuales se obtuvieron recuperaciones de oro de 46 y 30% respectivamente.
- Un aumento en la concentración de tiosulfato de sodio tiene un efecto positivo en la recuperación de oro en el lixiviado, al incrementar la concentración de tiosulfato de 0,2 a 0,4 y 0,7 M se

consiguieron recuperaciones de oro de 46, 48 y 81 % respectivamente. Además, al incrementar la concentración del agente lixiviante, se consigue el máximo de recuperación de oro a la primera hora de iniciado el proceso, lo que indica que se requiere menos tiempo para disolver el oro contenido en el mineral.

2.2. BASES TEÓRICAS – CIENTÍFICAS

2.2.1. Propiedades del oro

- **Propiedades físicas.** El oro se halla en la naturaleza en una proporción bajísima. Es un metal de color amarillo característico, blando, muy dúctil y maleable, pues puede reducirse a láminas hasta una diezmilésima de milímetro de espesor (pan de oro); en la escala de dureza de Mohs está entre 2,5 y 3 y posee una gravedad específica de 19,3 gr/cm³. Es inalterable frente a los agentes atmosféricos y solo es atacable por muy pocos agentes químicos, como el cloro, el bromo, el agua regia, el mercurio y el cianuro de sodio en presencia de oxígeno.
- **Composición y estructura.** Entre el oro y la plata, existe una serie compleja de asociaciones y la mayor parte del oro contiene plata. El oro de California, contiene de 10 a 15 % de plata y cuando este último elemento está en proporción mayor del 20%, la aleación es llamada electro. En el caso del yacimiento, la plata se encuentra como electrum y como pirargirita, y parte del oro se

encuentra incluido al cuarzo por lo requiere mayor liberación y otra parte se encuentra fino por lo que no debe sobre molerse.

- **Diagnóstico.** El oro se distingue de otros sulfuros amarillos (particularmente la pirita y la calcopirita) y de las micas amarillas por su ductilidad y gran peso específico. Se funde fácilmente a 1063°C.
- **Yacimiento.** El oro es un elemento que aparece en la naturaleza diseminado en pequeñas cantidades. Se halla en filones que tienen relación genética con rocas ígneas de tipo silíceo. Gran parte aparece como metal nativo, siendo el telurio y posiblemente, el selenio los únicos elementos que se le combinan en la naturaleza. La principal fuente de oro son los llamados filones hidrotermales de cuarzo y oro, donde junto con la pirita y otros sulfuros, el oro fue depositado por soluciones minerales ascendentes que lo contenían. El oro está simplemente asociado a los sulfuros y no en forma de combinación química alguna. En la superficie terrestre y cerca de ella, los sulfuros que contienen oro normalmente están oxidados, dejándolo libre y haciendo así su extracción muy fácil. En la mayoría de los filones, el oro está finamente dividido y distribuido de forma tan uniforme, que su presencia no puede ser detectada por simple inspección. Los filones que contienen oro, sometidos a la acción del tiempo y meteorizados, liberan el oro que, o bien queda en el manto del suelo, arenas fluviales, o es arrastrado a los arroyos vecinos para

formar placeres. Debido a su gran peso específico, el oro se separa mecánicamente de los materiales más ligeros, de las arenas y lechos de la corriente.

- **Empleo.** El principal empleo del oro se da en joyería, instrumentos científicos, placas electrolíticas, pan de oro, prótesis dentales y en lingotes de inversión.

2.2.2. Minerales auríferos

Los depósitos del mineral de oro se pueden clasificar en los grupos: Veneros de oro-cuarzo; depósitos epitermales, placeres jóvenes, placeres fósiles; depósitos con oro diseminado; oro en menas de metales no ferrosos; oro en agua de mar.

- **Menas de Oro Nativo:** En las cuales el metal precioso puede ser removido por separación gravimétrica, amalgamación, cianuración y sales oxidantes.
- **Oro Asociado a Sulfuros:** Están presentes como partículas libres o diseminadas en el sulfuro. Las piritas auríferas con oro finamente diseminado en su matriz son bastante comunes. La pirita es relativamente estable en cianuros, en medio de sales oxidantes es disuelto y favorece el proceso por la formación de iones férrico. La pirrotita se disuelve y consume cianuro.
- **Teluros de Oro:** Se encuentra el oro en forma nativa y sulfuros del mismo. La calaverita es un mineral que contiene cerca del 40% de oro, la silvanita contiene 25% de oro con 13% de plata.

- **Oro con otros Minerales:** Se presenta con arsénico y antimonio con trazas de cobre, selenio y telurio, así como plomo, cinc y materias carbonáceas.

2.2.3. Minerales refractarios

El término *refractario* es empleado para clasificar, a aquellos minerales que no pueden ser procesados mediante lixiviación directa con cianuro (como el caso de minerales refractarios de oro y plata).

Se considera como refractario cuando al someterlo al proceso de cianuración su recuperación es menor al 50% (*Orrantia, Pecina, 2008*).

Los minerales primarios de oro a menudo son refractarios porque el oro se encuentra ocluido (diseminado en pequeñas partículas que miden $< 1 \mu\text{m}$), en una matriz de sulfuros (*Ofori-Sarpong G. et al., 2011 and Ma et al., 2010*). Las especies más comunes son la pirita y la arsenopirita encontrándose en menor cantidad sulfuros como la esfalerita y la galena, además de sulfosales de cobre y antimonio, la presencia de carbonatos, sulfuros y aluminosilicatos también influyen en una baja recuperación de oro y plata (*Karimi et al., 2010*).

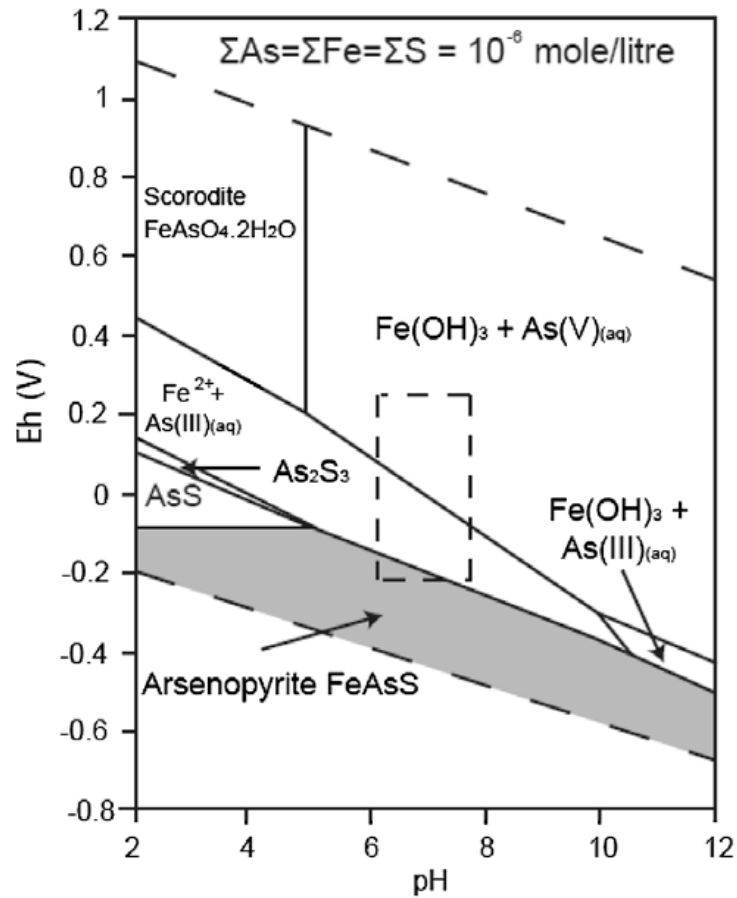
- **Arsenopirita (FeAsS)**

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

Por estos considerandos, la arsenopirita está 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 H_2SO_4 , H_3AsO_3 y 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 C.L. and Vaughan D.J., 2009*).

En el diagrama de Pourbaix mostrado en el gráfico 1, se observa los campos de estabilidad de los sistemas Fe-As-S-O, para un rango de pH y Eh determinados.

Gráfico 1 Diagramas de Pourbaix para el sistema Fe-As-S-O
(25 C y 1 atm)



Fuente: Corkhill C.L. and Vaughan D.J., 2009

- **Pirita (FeS_2)**

La oxidación de la pirita, el sulfuro metálico más abundante sobre la superficie terrestre, es un proceso dominante que genera la acidificación de aguas naturales. Recientemente Rickard & Luther (2007) estimaron que debido a la reducción biogénica del sulfato ferroso, alrededor de 5 millones de toneladas de mineral son producidas anualmente en los ambientes marinos.

Quizás uno de los ejemplos más sorprendentes de cómo la reactividad de la pirita puede afectar el medioambiente es la actividad antropogénica.

La disolución oxidativa de la pirita, ya sea proveniente de las inclusiones en el carbón o de las actividades mineras, produce un tipo de deterioro ambiental conocido como drenajes ácidos de minería (DAM). Éste proceso, a través de la generación de ácido sulfúrico e hidróxidos de hierro, es el responsable de la contaminación de cerca de 10,000 arroyos y ríos y alrededor de 18 kilómetros cuadrados de lagos y reservas, solo en los Estados Unidos. La mitigación del daño generado por los drenajes ácidos de minería le cuesta a la industria minera carbonífera cerca de un millón de dólares por día. Además, la disolución ácida de la pirita libera al ambiente metales pesados como el arsénico, cobalto, plomo, níquel y cinc (*Parga J.R. and Carrillo F.R., 1995*).

- **Tratamiento de minerales refractarios**

Los minerales refractarios de oro no responden a la cianuración directa; por lo tanto, dichos minerales tienen que ser tratados previamente antes de la cianuración para liberar los contenidos de oro y plata de forma tal que sean susceptibles a la extracción con solución de cianuro, en un proceso que incluye también la menor cantidad de cianuro,

para evitar costos y problemas ambientales al disponer de él (Oktay Celep et. al., 2011).

La biooxidación, la oxidación química, la molienda ultrafina, la oxidación a presión son algunos de los pretratamientos más empleados en los minerales auríferos refractarios. (Celep, 2009).

✓ **Oxidación con permanganato de potasio**

Un proceso redox implica la transferencia de electrones entre un oxidante y un reductor. El permanganato, es un oxidante importante en muchas reacciones redox ya sean del tipo orgánico o inorgánico, el Mn (VII) es conocido por su versatilidad, en medio ácido acepta 5 electrones en medio básico o neutro 3 electrones. Además, la oxidación de permanganato se considera como un proceso respetuoso hacia el medio ambiente.

Como oxidantes químicos se encuentra la utilización de muchos iones metálicos monoatómicos, por ejemplo, Ag (I), Fe (III), Ce (IV), Cr (VI), Mn (VII), etc., y algunos oxidantes de tipo biológicos como el FAD, NADP, etc.; sin embargo, el permanganato, proporciona excelentes resultados es por ello que ha sido utilizado en un gran número de procesos de oxidación. En el ion permanganato, el manganeso

tiene un estado de oxidación de +7. El permanganato de sodio y de potasio se preparan en gran escala por la oxidación electrolítica de soluciones básicas de MnO_4^- . En soluciones acuosas, se da un intenso color púrpura y sus sales cristalinas son parecidas al color negro.

Es estable en medio neutro o ligeramente alcalino, pero, en un medio fuertemente alcalino, reacciona con iones hidróxido para formar manganeso (V) o manganeso (VI). En consecuencia, a valores de pH alto, a veces resulta difícil determinar si está llevando a cabo una oxidación a través de un proceso de uno o dos electrones, (*Dasch et. al., 2009*).

✓ **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.

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.

El oro posteriormente es lixiviado por diferentes métodos, principalmente por cianuración. La biooxidación de minerales refractarios con concentrados de oro permite el proceso posterior de la cianuración obteniéndose recuperaciones que pueden llegar al 95% de oro (*Ciftci H., 2010*).

Uno de los factores principales a tener en cuenta en procesos de biooxidación son las altas concentraciones de arsénico provenientes de la disolución de la arsenopirita y, en menor cantidad, la pirita, responsables en gran medida de la disminución de la actividad bacteriana debido a la interferencia en el proceso de formación de ATP por la formación de un complejo ADP-arsénico inestable, generando la inhibición en la velocidad de crecimiento (*Harvey and Crundwell, 1996*).

Las bacterias como *Leptospirillum ferrooxidans* son microorganismos químiolitoautótrofos que obtienen su

energía de la oxidación de sustancias inorgánicas sencillas y construyen sus moléculas fijando el carbono procedente del CO₂. A diferencia de *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans* es estrictamente autótrofa y utiliza Fe⁺² como única fuente de energía (M. Stoytcheva, 2009). Su actividad metabólica consiste en la oxidación de hierro ferroso con oxígeno molecular como aceptor de electrones y la secreción de una sustancia polimérica extracelular (EPS) que ayuda a la disolución de la superficie del mineral (Corkhill et. al., 2008). Tiene mayor afinidad por el ion ferroso y es menos sensible a la inhibición del ion férrico.

La presencia de *Leptospirillum ferrooxidans* juega un papel muy importante en la generación de sulfato férrico en el proceso de la biolixiviación.

✓ **Molienda ultrafina**

La mayoría de los procesos metalúrgicos utilizan la molienda para reducir el tamaño de partículas antes de continuar con los procesos químicos (Welham, 2001).

La ventaja que tiene la molienda de alta energía sobre la molienda tradicional, es que logra que las partículas de polvo sean sometidas a repetidas fracturas mediante el choque continuo de éstas. Generalmente,

en una reacción química que ocurre en condiciones normales la energía de activación es suministrada térmicamente; sin embargo, para una reacción que es llevada a cabo por molienda la energía de activación es mecánica.

Proporcionando los requerimientos térmicos adecuados para que se produzca la reacción, la molienda mecánica de alta energía proporciona las condiciones cinéticas para que las reacciones ocurran a temperatura ambiente. (Aylmore, *et. al.*, 1996) y en periodos más cortos al proporcionar mayor cantidad de energía.

La molienda mecánica incrementa las velocidades de reacción, al mantener una mayor área superficial se obtiene mayor finura. Y por lo tanto proporcionan simultáneamente las condiciones de rápida difusión de las especies reactantes a la fase de productos.

Las principales ventajas en comparación con los métodos tradicionales, se encuentran en que las moliendas ultrafinas usan un menor número de operaciones como el uso de solventes y gases y la posibilidad de obtener un producto en estado metaestable. Los aspectos ambientales de estos

procesos son particularmente atractivos (*Balaz P. and Dutkova E., 2009*).

En el proceso de concentración de minerales, la molienda tiene los más altos costos, que requiere un análisis para su utilización.

✓ **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 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 (*Vladimir Arias Arce, 2005*).

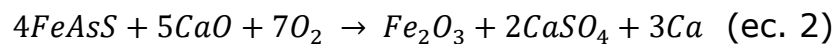
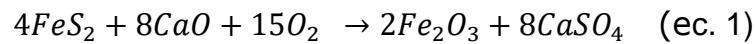
La principal ventaja de la tostación oxidativa es la elevada eficiencia de extracción de oro y que resulta ser un proceso flexible.

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.

Tostación empleando agentes de fijación

Queda claro que la tostación oxidativa podría ser la mejor opción para el procesamiento de minerales refractarios de oro si la contaminación pudiera ser minimizada. Para lograr esto se han intentado el uso de agentes que tienen el rol de fijar el azufre durante la tostación. La clave es la introducción de reactivos que formen compuestos estables con el arsénico y el azufre a medida que ocurre la tostación. Este concepto fue propuesto inicialmente por Barlett y Haung en 1970 para tratar concentrados de sulfuros de cobres. En la década de 1990 este trabajo fue adoptado por Taylor y varios colaboradores para trabajar con concentrados de oro refractario. En los primeros estudios la cal es el agente de fijación empleado para la recolección de residuos de azufre y arsénico convirtiéndolos en

sulfato de calcio estable y arseniato como se describen en las siguientes reacciones (1 y 2): (Liu *J. et al.*, 2000).

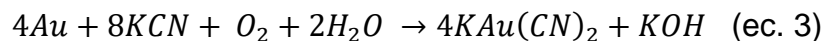


2.2.4. Cianuración

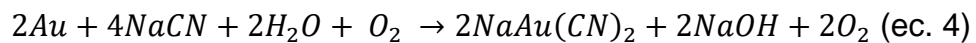
a) Química de la cianuración.

El proceso de cianuración para extraer oro y plata a partir de sus menas, fue desarrollado por J. S. MacArthur, R.V. Forrest y W. Forrest (1887).

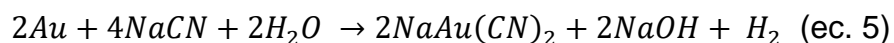
Elsner fue el primero que propuso la reacción química de disolución del oro por cianuros alcalinos.



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



Otra de las reacciones sugeridas es la de Janin



Termodinámicamente no es posible esta reacción, durante la cianuración no hay producción de H₂ lo que confirma la validez de la

ecuación propuesta por Elsner, donde el O_2 juega un rol fundamental.

b) Cinética de la cianuración.

En el tiempo que se desarrolla la reacción, en la etapa de menor velocidad (llamada también etapa controlante) es importante identificar a esta para incrementar su velocidad.

Las etapas secuenciales del proceso de lixiviación de plata por cianuración son:

- Absorción o solubilización del oxígeno por la solución.
- Mezcla turbulenta de los reactantes.
- Adsorción de los reactantes en la superficie del sólido.
- Reacción electroquímica.
- Disolución de los complejos solubles de oro y plata cianurado y otros productos desde la superficie del sólido.
- Transporte de los iones solubles hacia la solución.

El tiempo que emplean las etapas 1 y 5 son controlados por las velocidades de difusión, en tanto que las etapas 2, 3 y 4 es función de la rapidez de los procesos químicos. Si la difusión es muy lenta, una mayor agitación es necesaria para acelerar la reacción; si en cambio esta última es retardada por los procesos químicos, se debe incrementar la temperatura.

La cianuración está gobernada por las Leyes de Fick, expresadas matemáticamente de la siguiente manera:

$$\frac{D(O_2)}{dt} = D_{O_2} \frac{A_1}{\delta} ([O_2] - [O_2]_s) \text{ (ec. 6)}$$

$$\frac{D(CN^-)}{dt} = D_{CN^-} \frac{A_2}{\delta} ([CN^-] - [CN^-]_s) \quad (\text{ec. 7})$$

dónde:

$\frac{D(O_2)}{dt}$ y $\frac{D(CN^-)}{dt}$ son las velocidades de difusión de O_2 y CN^-

D_{O_2} y D_{CN^-} coeficientes de difusión en cm^2/s

A_1 y A_2 son superficie anódica y catódica en cm^2

δ ancho de la capa límite de Nerst, en cm.

$[O_2]$ y $[CN^-]$ concentración de oxígeno y cianuro en solución

$[O_2]_s$ y $[CN^-]_s$ concentración sobre la superficie de la reacción

Si en las dos ecuaciones anteriores se considera que la reacción química es muy rápida, se tiene $[O_2]_s = [CN^-]_s = 0$. Si se acepta, asimismo, que la velocidad de disolución del metal es dos veces la del oxígeno y solo la mitad la del cianuro, se obtiene la siguiente igualdad:

$$2D_{O_2} \frac{A_1}{\delta} [O_2] = \frac{1}{2} D_{CN^-} \frac{A_2}{\delta} [CN^-] \quad (\text{ec. 8})$$

Se debe tener en cuenta además que área total es $A = A_1 + A_2$. Resolviendo este sistema de ecuaciones. Se deduce que la velocidad de cianuración es:

$$V = \frac{2 A D_{CN^-} D_{O_2} [CN^-] [O_2]}{\delta (D_{CN^-} [CN^-] + 4D_{O_2} [O_2])} \quad (\text{ec. 9})$$

Obtenida esta ecuación, se deben considerar dos posibilidades. Cuando las concentraciones de cianuro son bajas, el

primer término del denominador es despreciable respecto del segundo; con lo cual, de la expresión anterior, se tiene:

$$V = \frac{1}{2} D_{CN^-} \frac{A}{\delta} [CN^-] \text{ (ec. 10)}$$

$$V = K_1 [CN^-] \text{ (ec. 11)}$$

Por lo tanto, en estas condiciones, la velocidad de lixiviación es función de la concentración de cianuro, hecho que ha sido comprobado experimentalmente.

La segunda posibilidad es que las concentraciones de este compuesto sean altas. En este caso, el segundo término del denominador es despreciable respecto del primero, por lo que la ecuación se convierte en:

$$V = 2 D_{O_2} \frac{A}{\delta} [O_2] \text{ (ec. 12)}$$

$$V = K_2 [O_2] \text{ (ec. 13)}$$

Esto significa que, a alta concentración de cianuro, la velocidad de disolución depende solamente de la concentración de oxígeno. Los experimentos han corroborado también esta previsión teórica.

Para hallar el límite en el cual el predominio de una de las concentraciones cede el paso a la otra en el control de la velocidad de lixiviación, se debe volver a la ecuación general. Cuando dicha ecuación se cumple:

$$D_{CN^-} [CN^-] = 4 D_{O_2} [O_2] \text{ (ec. 14)}$$

Expresado de otro modo:

$$\frac{[CN^-]}{[O_2]} = \frac{4 D_{O_2}}{D_{CN^-}} \quad (ec. 15)$$

Y se asume que $\frac{D_{O_2}}{D_{CN^-}} = 1,5$ (promedio establecido a partir de diferentes pruebas experimentales), se determina que el límite referido se alcanza cuando: $\frac{[CN^-]}{[O_2]} = 6$ (ec. 16)

Los valores encontrados en las experiencias de laboratorio varían de 4,6 a 7,4 por lo que la obtención teórica se considera representativo.

Es evidente que, en toda la demostración anterior, es importante conocer la cantidad de oxígeno disuelto durante la cianuración. Como esta cantidad varía con la altitud y la temperatura a las que se realiza el experimento.

La tabla siguiente resume la solubilidad de los minerales que acompañan al oro y plata, por la formación de cianicidas.

Tabla 1 Solubilidad de especies minerales en cianuro

Minerales	% EXTRACCIÓN	
	25°C	45°C
Minerales de Zinc		
Esfalerita, ZnS	18,4	
Willemita, Zn ₂ SiO ₃	13,1	
Hidrozincita, 3ZnCO ₃ .2H ₂ O	35,1	
Zincita, ZnO	35,2	
Smithsonita, ZnCO ₃	40,2	
Minerales de cobre		
Azurita, 2CuCO ₃ .Cu(OH) ₂	94,5	100,0

Malaquita, $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	90,2	100,0
Cuprita, Cu_2O	85,5	100,0
Calcosita, Cu_2S	90,2	100,0
Calcopirita, CuFeS_2	5,6	8,2
Bornita, $\text{FeS}_2\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{CuS}$	70,0	100,0
Enargita, $3\text{CuSAs}_2\text{S}_3$	5,8	75,1
Tetraedrita, $4\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{Sb}_2\text{S}_3$	21,9	43,7
Cu	90,0	100,0

Minerales de Hierro

Óxidos de Hierro	No son afectados	
Ankerita, Carbonato complejo de Fe	Ligeramente soluble a $\text{pH} < 10$	
Pirita, FeS_2	5	10
Marcasita, FeS_2	10	15
Pirrotita, FeS_x	100,0	
Melanterita, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	100,0	

Minerales de Arsénico y Antimonio	$\text{pH}: 12,2$	$\text{pH}: 10,1$
Oropimente, As_2S_3	73,0	14,0
Rejalgar, As_2S_2	9,4	2,0
Arsenopirita, FeAsS	0,9	0,3
Estibina, Sb_2S_3	21,1	1,5

Fuente: Metalurgia del Oro – F. Misari

c) Variables que intervienen en la cinética de la cianuración

- **Temperatura:** Como resultado del aumento de las actividades y las velocidades de difusión de las especies reaccionantes, aumenta la velocidad de disolución del oro con la temperatura, hasta llegar a un máximo de 85°C aproximadamente.

Por encima de esta temperatura la disminución de la solubilidad del oxígeno supera los beneficios de la actividad

iónica del oro y las velocidades de difusión. Experiencias de investigadores sugieren que con un aumento del 20% al 25% en la velocidad de disolución se consigue elevar la temperatura de 25°C a 85°C.

El alto costo asociado con un aumento de la temperatura no justifica para el tratamiento de minerales de baja ley, por lo que generalmente se realiza a temperatura ambiente.

- **pH:** El diagrama Eh-pH para el sistema oro-cianuro, indica que el impulso electroquímico para la disolución, es decir, la diferencia de potencial y las reacciones de reducción del oxígeno, se maximiza a valores de pH entre 10 y 11 aproximadamente, para evitar la pérdida excesiva de cianuro por la formación de gas cianhídrico y retardar la cinética de lixiviación.
- **Área superficial:** La velocidad de disolución es directamente proporcional a la superficie expuesta del oro y de otros factores de las partículas.

El área de superficie expuesta se relaciona con la distribución de tamaño de partículas y las características de liberación de la materia prima, y es afectada por la eficiencia de los procesos de trituración anterior a la lixiviación.

La velocidad aumenta con la disminución del tamaño de partículas, debido a un aumento de la superficie de las partículas de oro.

Sin embargo, no siempre, la velocidad de disolución de minerales de oro aumenta con la disminución del tamaño de partícula, porque puede incrementarse las reacciones secundarias de otros elementos que consumen los reactivos.

El tamaño de partícula óptimo es una relación entre la extracción de oro y el consumo de cianuro. Alternativamente el tratamiento previo de oxidación puede presentar la vía de procesamiento más atractivo para estos minerales.

- **Agitación:** La disolución del oro está relacionada por lo general al transporte de masa en condiciones normalmente controladas y se aplica en la lixiviación con cianuro, por lo que la velocidad depende del espesor de la capa de difusión y las características de la mezcla o pulpa.

El aumento de la agitación aumenta la velocidad de disolución hasta un máximo, a partir del cual la agitación tiene poco o ningún efecto. El espesor de la capa de difusión se minimiza, aumentando la velocidad de flujo de la solución con las últimas partículas sólidas.

En los sistemas de lixiviación en pilas, bateas o in situ, el espesor de la capa de difusión estacionaria alrededor de las

partículas sólidas se determina por la velocidad de flujo de la solución.

Cuando se trata de partículas gruesas, la difusión por poros juega un papel muy importante (y a veces predominante) en obtener los reactivos y productos desde y hacia la superficie del mineral.

- **Efecto de los iones de plomo y otros metales:** Muchos minerales y concentrados contienen pequeñas cantidades de mercurio y plomo solubles en agua y con menos frecuencia bismuto y talio, que, naturalmente pueden ayudar en el proceso de lixiviación.

La desventaja potencial de esta práctica es que cualquier especie de metal añadido podrá presentarse en el producto final o en los relaves.

Aunque la adición de iones plomo a concentraciones de 1 a 10 mg/l puede ser beneficioso, as concentraciones de plomo en exceso de 20 mg/l se han encontrado que retardan la disolución.

La adición de 20 mg/l de talio ha demostrado tener un efecto beneficioso significativo sobre la lixiviación.

- **Interacción galvánica con minerales de sulfuro:** Muchos minerales sulfurados tienen conductividad suficiente para

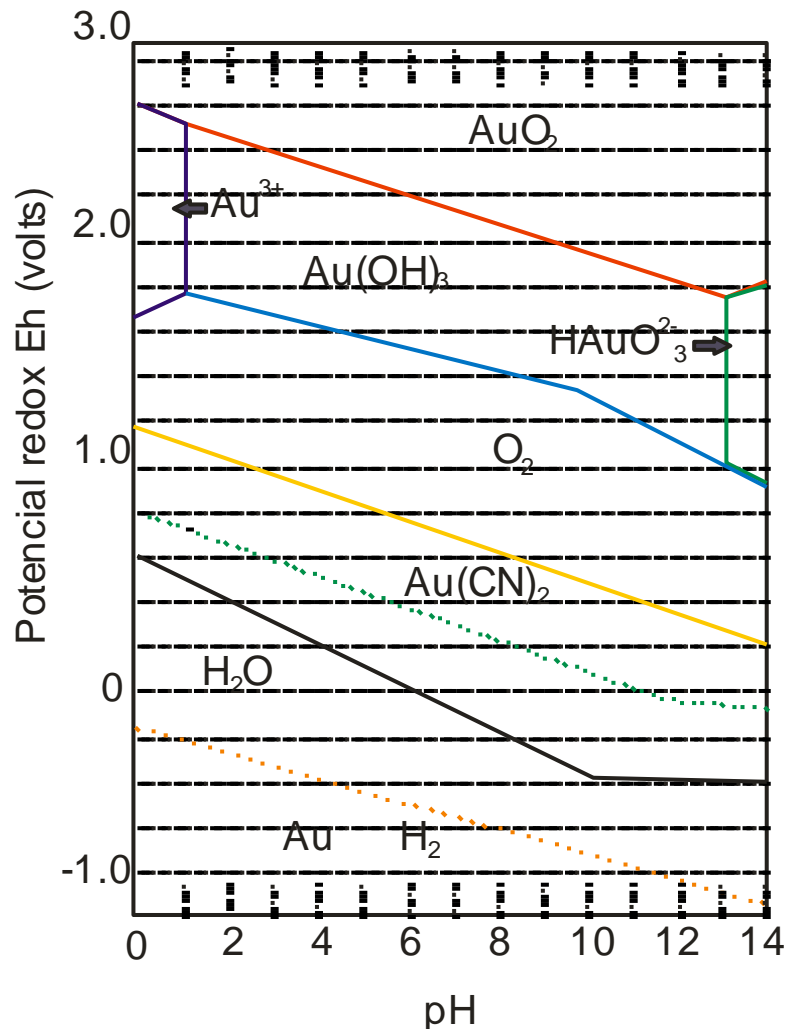
permitir reacciones de transferencia de electrones en su superficie. Cuando tales sulfuros minerales, están en contacto eléctrico con el oro, la interacción galvánica puede ocurrir durante la lixiviación, esto puede afectar a la velocidad de lixiviación.

- **Concentración de cianuro:** Lo más importante es la cantidad de cianuro por tonelada de mineral que ingresa y su concentración en la solución lixivante; ya que el cianuro disuelve al oro y la plata selectivamente a menores concentraciones. A mayor concentración de cianuro tendremos más metales disueltos.
- **Taza de riego:** Esta variable influye directamente en la cinética de lixiviación del mineral, si se trata en pilas o botaderos; al incrementarse la taza de riego, la velocidad de disolución del oro es mayor, debido al ingreso de mayor cantidad de cianuro al mineral, sin embargo, el contenido de oro en la solución es menor debido al efecto de dilución.
- **Oxígeno disuelto:** Su efecto ha sido estudiado, sin conseguir mayores efectos en la cinética de lixiviación y recuperación del oro. Sin embargo, se ha llegado a la conclusión que el cianuro es el que maneja la velocidad y recuperación. La cantidad de oxígeno disuelto en la solución lixivante depende del medio ambiente.

d) Termodinámica de la cianuración

Para comprobar los mecanismos fisicoquímicos de la lixiviación del oro, es necesario recurrir a una revisión de sus principales propiedades termodinámicas y en particular de sus estados estables y metaestables, representados clásicamente en los diagramas de Pourbaix (gráfico 2 y 3) que relacionan el potencial de óxido – reducción (Eh) del metal con el pH del medio. Estos diagramas muestran que compuestos como $\text{Au}(\text{OH})_3$, AuO_2 , HAuO_3^{2-} y también el ión Au^{3+} requieren elevados potenciales redox (superiores al de la descomposición del oxígeno) para formarse. La lixiviación del oro metálico es, por lo tanto, muy difícil a causa de la gran estabilidad de este último.

Gráfico 1 Diagrama de estabilidad potencial – pH
para el sistema Au – H₂O – CN⁻

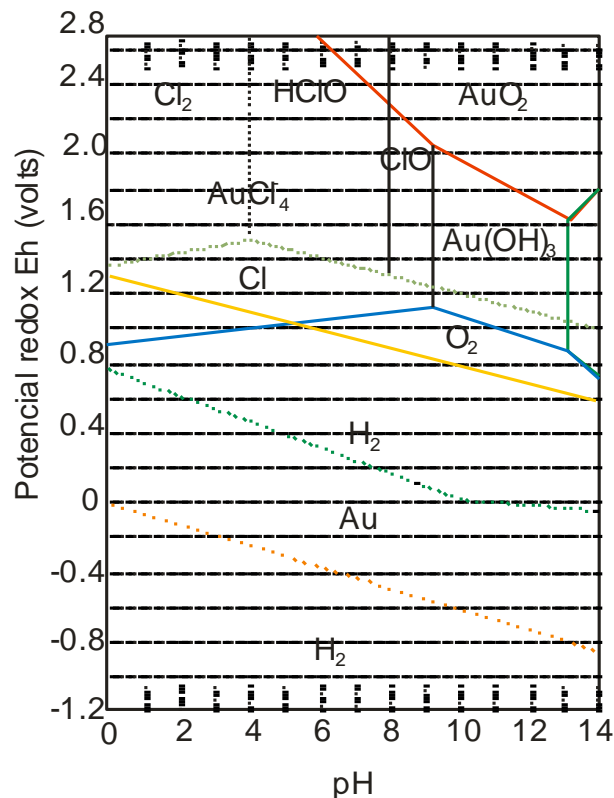


Fuente: Metalurgia del oro – F- Misari

En el diagrama Au – H₂O – CN⁻, no obstante, la reacción $Au(CN)^{-2} + e^{-} \rightarrow Au + 2CN^{-}$, se lleva a cabo dentro de los límites de estabilidad del agua. El campo de estabilidad del complejo aurocianuro está limitado por una recta que inicialmente muestra una pendiente pronunciada (efecto del hidrólisis del cianuro a pH menor a 9), tornándose luego casi horizontal debido a la acción oxidante del oxígeno en medio básico; hecho que a su vez permite que se haga

efectiva la reacción de lixiviación por formación de aurocianuros. En el mismo gráfico se puede observar que los compuestos $\text{Au}(\text{OH})_3$, Au^{3+} y HAuO_3^{2-} son reducidos por la introducción del cianuro.

Gráfico 2 Diagrama de estabilidad potencial – pH para el sistema Au – H₂O – Cl⁻



Fuente: Metalurgia del oro – F- Misari

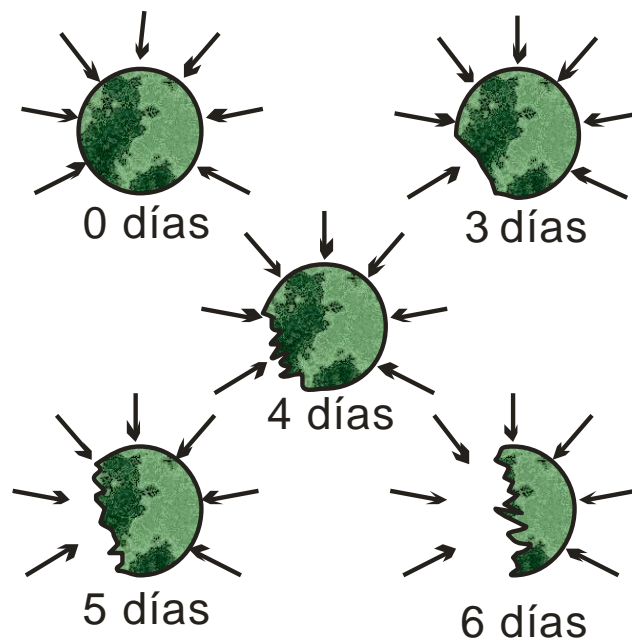
A título indicativo, se ha incluido también el diagrama Au-H₂O-Cl que muestra el ambiente fuertemente oxidante y ácido que es necesario para que el oro sea disuelto por iones cloro con la formación de AuCl_4 .

e) Mecanismo electroquímico

La lixiviación puede llevarse a cabo mediante mecanismos diversos, tanto físicos, químicos y electroquímicos, en cianuración

se ha podido establecer que la disolución está regida por los principios electroquímicos de la corrosión. Fue Thompson (1947) quien demostró este hecho utilizando para ello pequeñas esferas de oro y una solución solidificada como soportes de estas. Haciendo circular una corriente de KCN libre de aire constató, al cabo de tres días, una ligera corrosión en el lado opuesto al de la incidencia del flujo (gráfico 4); después de otros tres días, la partícula de oro había sido reducida a la mitad.

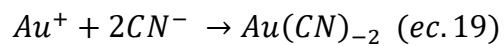
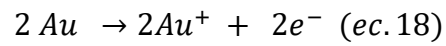
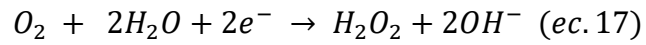
Gráfico 3 Ilustración de la naturaleza electroquímica de la disolución de partículas de oro ($120\ \mu$ diámetro) en KCN, en presencia de oxígeno



Fuente: Hidrometalurgia – F- Habashi

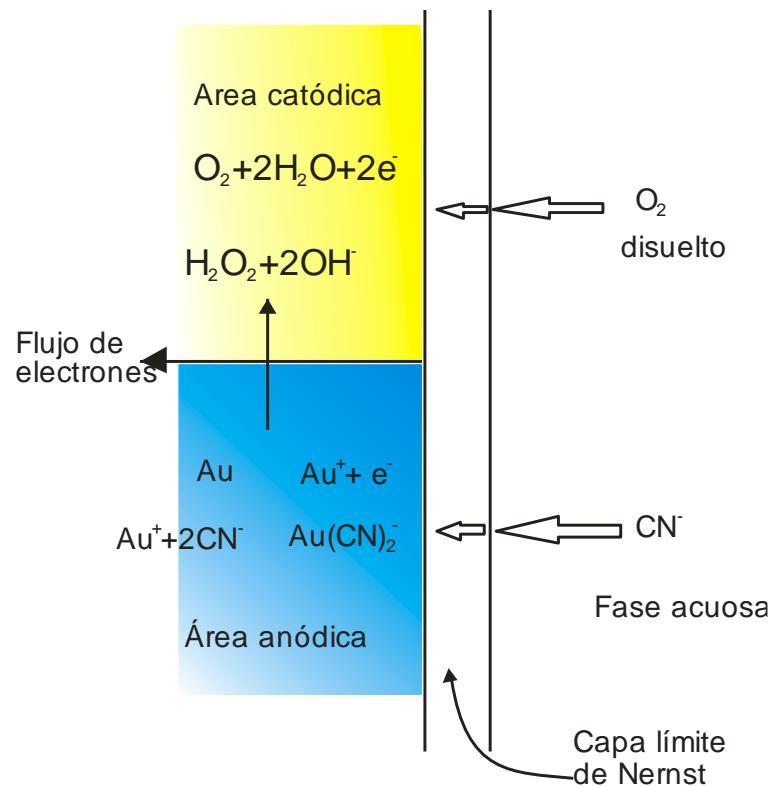
La explicación esquemática de este fenómeno se facilita mediante el gráfico 5; la reducción del oxígeno sobre la superficie

metálica en la zona catódica va acompañada por la oxidación del oro en la zona anódica de acuerdo a las siguientes reacciones:



El experimento demuestra que existe un flujo de electrones entre la fase líquida donde se encuentra el oxígeno disuelto y el cianuro y la fase sólida constituida por el oro. La capa límite de Nernst, situada entre ambas fases, tiene un espesor variable según el método de lixiviación y la velocidad de agitación.

Gráfico 4 Representación esquemática de la disolución de oro en soluciones cianuradas por corrosión electroquímica



Fuente: Hidrometalurgia – F- Habashi

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

- **Mineral sulfurado:** Mineral que en su composición tiene el ión azufre.
- **Matriz de cuarzo:** Compuesto mayormente de óxido de silicio y que en su interior tiene partículas de oro.
- **Mineral refractario:** Es una clasificación al que corresponden algunos minerales donde el material valioso (en nuestro caso el oro) se encuentra ocluida dentro de la matriz del mineral lo cual dificulta su liberación con una simple molienda y por lo tanto es difícil su recuperación por un proceso de cianuración convencional.

- **Oro grueso:** Oro que tiene de 0,2 mm de diámetro a más y se puede ver a simple vista.

2.4. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS

2.4.1. Hipótesis general

Si desarrollamos un modelo de caracterización y tratamiento por cianuración de los sulfuros, entonces; influirá en la recuperación de oro en Quío – Ambo - Huánuco – 2019.

2.4.2. Hipótesis específicas

- Si determinamos el modelo de caracterización mineralógica de los sulfuros, entonces, influirá en la recuperación de oro en Quío – Ambo – Huánuco – 2019.
- Si determinamos el rango de trabajo óptimo de las variables: densidad de pulpa, grado de liberación y velocidad de rotación del agitador entonces influirá en la recuperación de oro en Quío – Ambo – Huánuco – 2019.

2.5. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

2.5.1. Variables independientes

- Densidad de pulpa
- Grado de liberación de oro
- Velocidad de rotación del agitador.
- Consumo de NaCN
- pH

2.5.2. Variable dependiente

- % Recuperación de oro

2.5.3. Variables intervinientes

- Equipos

2.6. DEFINICIÓN OPERACIONAL DE VARIABLES E INDICADORES

VARIABLE	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores
Independiente:				
• Densidad de pulpa	Estado del mineral que requiere condiciones mínimas para su transformación al estado líquido.	Variables físicas y químicas que intervienen en la recuperación de oro.	1,00 – 1,50	gr/lt
• Grado de liberación de oro			100 - 200	micrones
• Velocidad de rotación del agitador.			100 - 450	RPM
• Consumo de NaCN			10 - 1000	gr/Tn
• pH			12 -13	basicidad
Dependiente:				
% Recuperación Oro	Resultado de un proceso metalúrgico	Acción físico química sobre el mineral	10 - 40	gr/tn

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Esta investigación es de tipo aplicada, la cual según Carrasco (2017), se caracteriza “por tener propósitos prácticos inmediatos bien definidos, es decir, se investiga para actuar, transformar, modificar o producir cambios en un determinado sector de la realidad” (p. 43).

NIVEL DE INVESTIGACIÓN

Siguiendo a Carrasco (2017), esta investigación es de nivel experimental, toda vez que se orientó a “conocer las causas o factores que han dado origen o han condicionado la recuperación de oro y/o las dificultades que presenta el mineral en estudio” (p. 42).

3.2. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

En la investigación se ha empleado el método deductivo, el cual como señalan Palomino, Peña, Zeballos y Orizano (2015), “Va de lo general a lo particular, parte del estudio de principios generales, leyes o teorías, para deducir por medio de los experimentos y suposiciones y llegar a la observación y registro de los datos de la disolución del oro” (p. 25).

3.3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El diseño de investigación es experimental transeccional; se manipulará intencionalmente la variable independiente y no existe un grupo de control; además, los hechos se investigan en un momento determinado (Carrasco, 2017).

3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.4.1. Población

La población según Carrasco (2017) constituye “el conjunto de todos los elementos (unidades de análisis) que pertenecen al ámbito espacial donde se desarrolla el trabajo de investigación” (p. 237). De esta manera, la población en este estudio la constituyen el afloramiento mineralizado que comprende ocho hectáreas, en los cuales se pretende explotar.

3.4.2. Muestra

Asimismo, la muestra se define como la parte representativa de la población “cuyas características esenciales son las de ser objetiva y reflejo fiel de ella, de tal manera que los resultados obtenidos en la

muestra puedan generalizarse a todos los elementos que conforman dicha población” (Carrasco, 2017, p. 237). En este estudio, la muestra comprende el número de calicatas realizadas y se partió de los siguientes valores:

n	=	Tamaño de la muestra	=	
z	=	Nivel de confianza (95%)	=	1,96
p	=	Proporción (50%)	=	0,50
q	=	Proporción (50%)	=	0,50
N	=	Tamaño de la población	=	100
e	=	Error máximo permitido (5%)	=	0,05

$$n = \frac{z^2 * p * q * N}{e^2(N - 1) + z^2 p * q} \quad (1)$$

Reemplazando se tiene:

$$n = \frac{(1.96)^2 * 0,50 * 0,50 * 100}{0.05^2(100 - 1) + (1.96)^2 * 0,50 * 0,50} = 80$$

3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.5.1. Caracterización de la muestra

a) Técnica a desarrollar

Para reconocer las muestras de mineral de oro se ha desarrollado la técnica del método de reflexión de luz para la microscopia de opacos (Laboratorio UNMSM).

a. Equipos y Materiales

- Microscopio de luz polarizada Karl Zeiss
- Lijas de diversa granulometría y finura de telas.

- Cortadora de muestras.
 - Mallas N° 200, 100, 150
 - Pulidora de muestras.
- b) Reactivos
- Bálsamo de Canadá
- c) Muestra
- Mineral representativo
- d) Procedimiento
- Corte de muestras.
 - Pulido de muestras
 - Observación al microscopio por tamaño de mallas.
- e) Recolección de datos.
- La técnica a emplear es la experiencia en el reconocimiento de minerales al microscopio.

3.5.2. Pruebas de concentración centrífuga

- a) Técnica a desarrollar
- Separación de minerales por su peso específico, la velocidad de agitación y dilución en agua.
- b) Equipos y Materiales
- Concentrador Falcon Tipo laboratorio
 - Molino de bolas de laboratorio
 - Bandejas.
- c) Muestra

- 5 Kg de mineral para cada experimento
- d) Procedimiento
- Chancado.
 - Molienda
 - Agitación
 - Centrifugación
- f) Recolección de datos.
- Para la recolección de datos se empleó los cuadros diseñados por matrices para calcular la recuperación de oro y plata.

3.5.3. Pruebas de cianuración

- a) Técnica a desarrollar
- Agitación en botellas
- b) Equipos y Materiales
- Agitador de rodillos para las pruebas en botellas.
 - Balanza de precisión; marca Mettler AE 160.
 - Vasos de precipitados: 100, 250, 400, 600 ml
 - Matraz erlemeyer: 250, 500 ml.
 - Secadora de muestras hasta 300°C.
 - Molino de bolas de laboratorio.
 - pH metro.- Hanna instruments – pH 301 (rango: -2 a 20)
 - Botellas
 - Chancadora de laboratorio.
 - Accesorios

- c) Reactivos
 - NaCN
 - CaO
 - Nitrato de plata.
 - Yoduro de potasio.
- d) Muestra
 - 2 Kg de mineral homogenizado
- e) Procedimiento
 - Molienda por 20 minutos.
 - Agitación en botellas por 30 horas
- f) Recolección de datos.
 - Los resultados de los análisis químicos de la recuperación se organizaron en tablas preestablecidas.

3.6. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

3.6.1. Caracterización de la muestra

La muestra representativa fue analizada al microscopio a 45 ampliaciones y se observa lo siguiente.

Tabla 2 Composición de la muestra

MINERAL	FÓRMULA	%
Cuarzo	SiO ₂	91,74
Ortoclasa	(K,Ba,Na)(Si,Al) ₄ O ₈	3,84
Algirita	NaFeSi ₂ O ₆	0,88
Lepidocrosita	FeO(OH)	0,81

Muscovita	$\text{KAlSi}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$	0,67
Pirita	FeS_2	0,61
Hematita	Fe_2O_3	0,57
Galena	PbS	0,51
Cloromagnesita	MgCl_2	0,37

Fuente: Lab. Mineralogía UNMSM

a) Mineralogía de la muestra a + 200 mallas

La caracterización mineralógica de esta muestra, indica todos los minerales observados mediante el microscopio de luz polarizada. Algunos minerales no han intervenido en el análisis modal debido a que están en el orden de trazas. Los minerales observados se aprecian en la siguiente tabla.

Tabla 3 Minerales observados al microscopio

MINERALES	FÓRMULA	ABREVIATURAS
Esfalerita	ZnS	Ef
Calcopirita	CuFeS_2	Cp
Pirita	FeS_2	Py
Pirrotita	Fe_7S_8	Po
Marcasita	FeS_2	Mc
Arsenopirita	FeAsS	Apy
Goethita	FeO.OH	Gt
limonita	FeO.OH	Lm
Galena	PbS	Gn

Gangas

GGs

Fuente: Lab. Mineralogía UNMSM

Tabla 4 tipos de entrelazamientos de los minerales
y sus posibilidades de liberación completa
(muestra: + 200 mallas)

MINERALES ENTRELAZADOS	TIPO ENTR.	NUM. PART.	DIST. %	POSIBILIDADES DE LIBERACIÓN COMPLETA
		656	93,31	
Py – GGs	1 al	1	0,14	Fácil
	1 all	1	0,14	Fácil
	1 bli	1	0,14	Moderadamente fácil
	1 dli	5	0,71	Imposible
	1 eli	19	2,70	Muy difícil a imposible
	1 eil	9	1,28	Muy difícil a imposible
Gn-GGs	1 bli	2	0,28	Moderadamente fácil
	4 cli	1	0,14	Muy difícil a imposible
rt – GGS	1 al	1	0,14	Fácil
gt – GGs	1 al	2	0,28	Fácil
	1 all	4	0,57	Fácil
Py – rt – GGs	1 bli	1	0,14	Moderadamente fácil
TOTAL		703	100,00	

Fuente: Lab. Mineralogía UNMSM

Mineral Aurífero

En esta muestra no se han observado minerales auríferos.

Minerales Argentíferos

No se han observado minerales de plata.

Minerales Ferríticos

Como minerales ferríticos están la pirita, arsenopirita, Pirrotita, goethita y la marcasita.

Minerales Cupríferos

Como mineral de cobre está la calcopirita y calcosita.

Minerales de Zinc

Como mineral de zinc está la esfalerita.

Minerales de plomo

Como minerales de plomo está la galena

Otros Minerales

En este grupo se encuentran las gangas (dentro de éstas están los silicatos y carbonatos).

b) Mineralogía de la muestra a - 200 mallas

La caracterización mineralógica de esta muestra indica todos los minerales que han sido observados mediante el microscopio de luz polarizada, como lo indica la tabla adjunta (algunos minerales no intervienen debido a que están en el orden de trazas).

Tabla 5 Minerales a mallas -200

MINERALES	FÓRMULA	ABREVIATURAS
Proustita	Ag_3AsS_3	Prs
Esfalerita	ZnS	Ef

Calcopirita	CuFeS_2	Cp
Pirita	FeS_2	Py
Pirrotita	Fe_7S_8	Po
Marcasita	FeS_2	Mc
Arsenopirita	FeAsS	Apy
Goethita	FeO.OH	Gt
Calcosita	CuS	Cc
Tetraedrita	$\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$	Td
Gangas		GGs

Fuente: Lab. Mineralogía UNMSM

Minerales Auríferos

En esta muestra no se han observado minerales auríferos.

Minerales Argentíferos

Se ha observado mineral de plata la cual es la proustita.

Minerales Ferríferos

Como minerales ferríferos están la pirita, arsenopirita, Pirrotita, goethita y la marcasita

Minerales Cupríferos

Como mineral de cobre está la calcopirita, calcosita y tetraedrita

Minerales de Zinc

Como mineral de zinc está la esfalerita.

Otros Minerales

En este grupo se encuentran las gangas (dentro de éstas están los silicatos y carbonatos).

Tabla 6 Tipos de entrelazamientos de los minerales y sus posibilidades de liberación completa (muestra: - 200 mallas)

MINERALES ENTRELAZADOS	TIPO ENTR.	NUM. PART.	DIST. %	POSIBILIDADES DE LIBERACIÓN COMPLETA
Partículas libres		993	99,60	
Py – GGs		2	0,20	Fácil
	1 al	2	0,20	Muy difícil a imposible
TOTAL	1 el	997	100,00	

Fuente: Lab. Mineralogía UNMSM

3.6.2. Pruebas de concentración centrífuga

a) Primera prueba de concentración centrífuga Falcon

- **Etapas de Molienda:**

El mineral fue preparado a una granulometría de 100% - 10 mallas. Para ello se redujo en su tamaño por medio de etapas de chancado primario y secundario de manera similar que en la etapa anterior. Después, en su ingreso al molino de bolas, se preparó a una dilución de 2/1, dándole un tiempo de molienda de 20 minutos lo que dio una granulometría de 55% -200 mallas. Pero en esta etapa se realizaron 5 moliendas, es decir, se emplearon 5 Kg de mineral para tener cantidad suficiente de

muestra que es lo requerido para la etapa posterior con el concentrador centrífugo Falcon como proceso de preconcentración.

- **Etapas de Concentración Centrífuga Falcon:**

Aquí, la pulpa producida por la etapa de molienda, es descargada en un pequeño tanque que tiene una agitación constante con lo cual evita el asentamiento de las partículas. Esto es muy importante porque el equipo Falcón requiere una alimentación de pulpa constante para una buena operación.

A continuación, se indica en la tabla siguiente, las condiciones de operación realizadas en el equipo Falcon.

Tabla 7 Condiciones de operación del concentrador Falcon

Granulometría: 55% -200 mallas

Condiciones:

Etapa	Dilución	Densidad de pulpa	Presión	Gravedad	Autopac	pH
Concentración centrífuga	02:01	1350	2,5 PSI	200 G	68 Hz	7.5

Fuente: Elaboración propia

b) segunda prueba de concentración centrífuga Falcon

- **Etapas de Molienda:**

El mineral fue preparado igual que para el proceso anterior de molienda, a una granulometría de 100% -10

mallas. Para ello, se redujo en su tamaño por medio de etapas de chancado primario y secundario. Después, en su ingreso al molino de bolas, se preparó a una dilución de 2/1, dándole un tiempo de molienda de 30 minutos que resultó una granulometría de 66% -200 mallas De igual manera se realizaron 5 moliendas, es decir, se emplearon 5 Kg de mineral para tener cantidad suficiente de muestra que es lo requerido para la etapa posterior con el concentrador Falcon como proceso de preconcentración.

- **Etapas de Concentración Centrífuga Falcón:**

En esta etapa de preconcentración toda la pulpa producida en la etapa de molienda es descargada en un pequeño tanque que tiene una agitación constante con la cual evita el asentamiento de las partículas.

A continuación, se presenta en la tabla siguiente, las condiciones de operación durante la prueba con el equipo Falcon.

Tabla 8 Condiciones de operación del concentrador Falcon

Granulometría: 66% - 200 mallas

Condiciones

Etapa	Dilución	Densidad de pulpa	Presión	Gravedad	Autopac	pH
Concentración centrífuga	02:01	1350	3 PSI	200 G	64 Hz	7,6

Fuente: Elab. propia

3.6.3. Pruebas de cianuración

Se procedió a realizar pruebas de cianuración en botellas, el mineral de cabeza, sin pre concentración a diferentes tiempos (12, 18, 24, 30 y 36 horas) cuyos balances metalúrgicos se observa en las tablas expuestas en los resultados.

- **Etapa de Molienda**

Se procedió a la molienda por 20 minutos iniciales, a una dilución de 2/1; obteniéndose una granulometría de 55% -200 mallas. Por experiencia de molienda en otras plantas de procesamiento de oro, se continuó, con la molienda a 30 minutos, para obtener un material al 100% malla -200. Acto seguido se procedió a la cianuración en botellas, adicionando los reactivos del siguiente modo.

Tabla 9 Consumo de reactivos y condiciones de operación

Granulometría: 55% -200 mallas

Condiciones:

Etapa	REACTIVOS ADICIONADOS (Kg/TM)		Dilución	Tiempo Cianuración (Hr)	pH
	NaCN (Kg/TM)	CaO (Kg/TM)			
Test 1	1,2	19,13	2/1	12	11,86
Test 2	1,5	19,18	2/1	18	11,92
Test 3	1,7	19,22	2/1	24	11,96
Test 4	1,8	19,26	2/1	30	11,98
Test 5	1,9	19,36	2/1	36	12,04

Fuente: Elab. Propia

3.7. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO

En el análisis de datos se ha utilizado un programa estadístico que nos permita identificar las variables que controlan la reacción química del proceso de lixiviación y para esto se aplicó el software estadístico MINITAB 19 con ello se analizó e interpretó, lo siguiente:

Primero se utilizó el diseño factorial, luego se calculó los factores e interacciones de los factores que intervienen; y se desarrolló el análisis de varianza (ANAVA).

El modelo matemático del proceso que identifica los factores a tomar en cuenta para su aplicación futura.

3.8. SELECCIÓN, VALIDACIÓN Y CONFIABILIDAD DE LOS INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

En cuanto a la validez y confiabilidad del instrumento, se ha desarrollado siguiendo los procedimientos estándares que se desarrolla tanto a nivel experimental como en la industria y que se puede obtener de la copiosa información existente en las redes electrónicas y los libros.

La confiabilidad del instrumento fue por juicio de expertos.

3.9. ORIENTACIÓN ÉTICA

Es comprensible que todo trabajo de investigación realizado debe ser un aporte a la ciencia y el desarrollo de un país, que se basa a referencias teóricas plasmadas en infinidad de libros y experiencias de las plantas de lixiviación de oro instaladas en el país.

El presente, si bien se basa a fundamentos teóricos pre establecidos, pero ha sido desarrollado cuidadosamente y es inédito.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DESCRIPCIÓN DE TRABAJO DE CAMPO

4.1.1. Caracterización de la muestra

a) Mineral a +200 mallas

La distribución volumétrica realizada en esta muestra se ha hecho sobre las observaciones obtenidas de los minerales presentes, otorgándole un porcentaje aproximado de volumen que ocupa en la briqueta.

Tabla 10 Observaciones al microscopio de opacos

MINERALES	VOLUMEN (%)
-----------	-------------

Esfalerita	0,30
------------	------

Pirita	4,60
--------	------

Pirrotita	0,44
Marcasita	0,19
Arsenopirita	5,81
Goethita	8,42
Gangas	80,25
TOTAL	100,00

Fuente: Elab. Propia

- **GRADOS DE LIBERACIÓN**

Los grados de liberación que exhiben los minerales que han intervenido en la molienda y se observa, son proporcionados en porcentajes y se indican en la tabla siguiente.

Tabla 11 Grados de liberación de los minerales a mallas 200

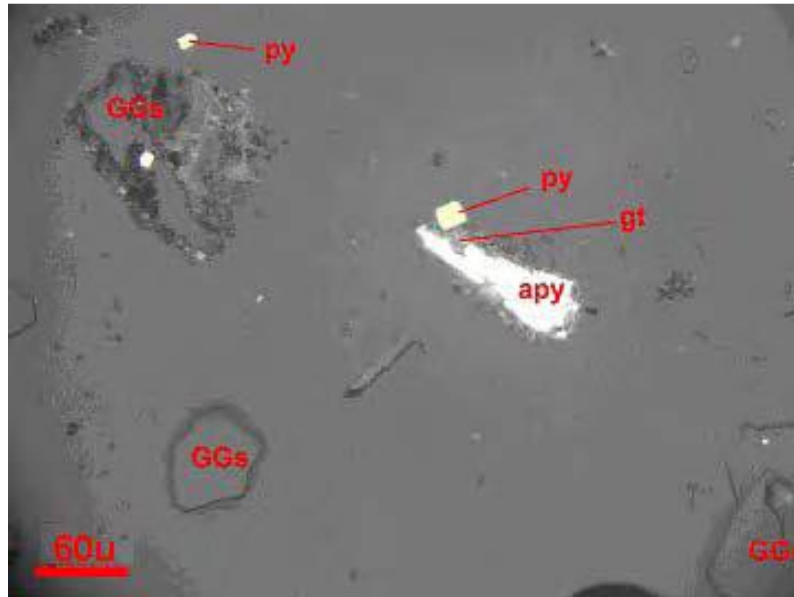
(Serie Tyler)

MINERALES	GRADO DE LIBERACIÓN
	(%)
Esfalerita	100
Pirita	99,65
Pirrotita	1,0
Marcasita	76,92
Arsenopirita	94,15
Goethita	96,46
Gangas	98,29

Fuente: Elab. Propia

Foto 1 se observa partículas libres de pirita (py), de gangas (GGs).
Y partícula entrelazada de Arsenopirita (apy) y goethita (gt).

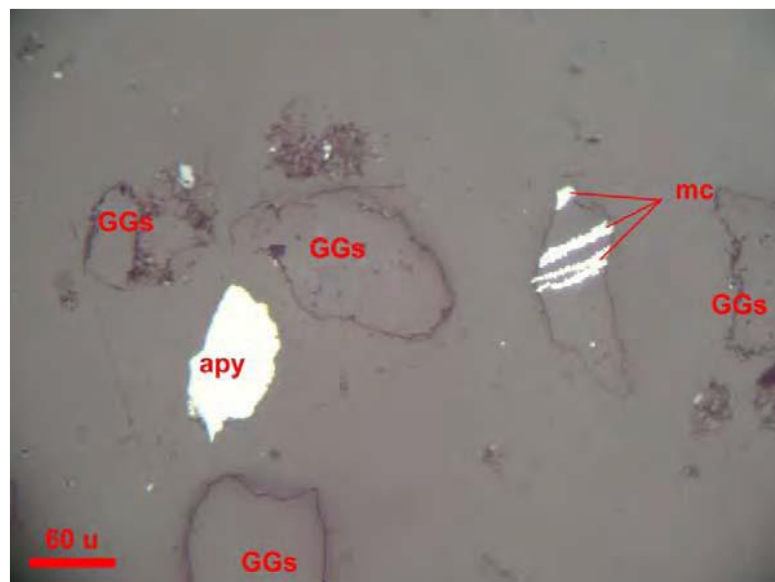
Magnificación: 500X



Fuente: Lab. Microscopia UNMSM

Foto 2 Se observa partículas libres de arsenopirita (apy) y de gangas (GGs).
Partícula entrelazada de marcasita (mc) y gangas (GGs)

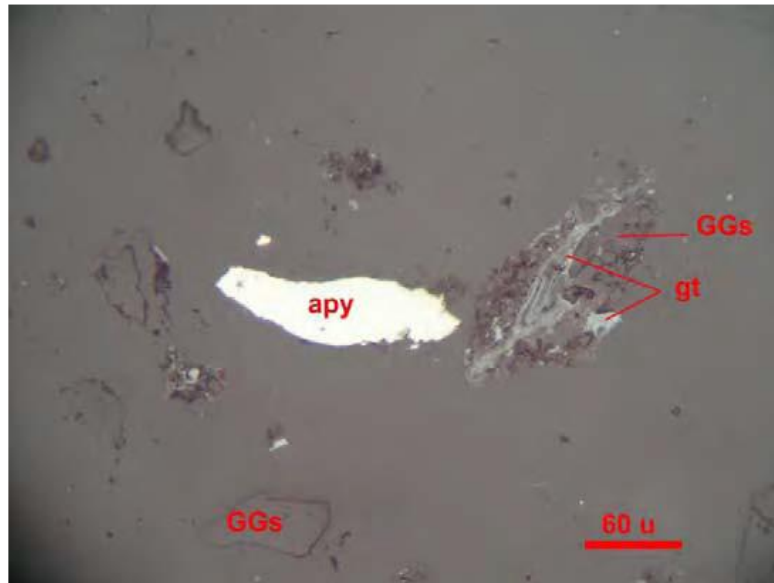
Magnificación: 500X



Fuente: Lab. Microscopia UNMSM

Foto 3 Se observa partículas libres de arsenopirita (apy) y de gangas (GGs).
Partícula entrelazada de goethita (gt) y gangas (GGs).

Magnificación: 500X



Fuente: Lab. Microscopia UNMSM

b) Mineral a – 200 mallas

La distribución volumétrica realizada en esta muestra se establece sobre la base de los minerales que han intervenido en el análisis modal como se indica en la tabla adjunta.

Tabla 12 Minerales presentes en la muestra

MINERALES	VOLUMEN (%)
Esfalerita	0,69
Calcopirita	0,02
Pirita	3,25
Marcasita	1,84
Arsenopirita	9,63
Goethita	35,48
Calcosita	0,21

Gangas	48,87
TOTAL	100,00

Fuente: Elab. Propia

▪ **GRADOS DE LIBERACIÓN**

Los grados de liberación que exhiben los minerales después de la molienda, en la presente muestra, nos indica las diferentes dificultades que han encontrado durante la etapa de la molienda. Los grados de liberación son proporcionados en porcentajes y se expone en la siguiente tabla.

Tabla 13 Grados de liberación de los minerales después de molienda

MINERALES	GRADO DE LIBERACIÓN
	(%)
Esfalerita	100,00
Calcopirita	0,00
Pirita	99,29
Marcasita	100,00
Arsenopirita	95,69
Goethita	100,00
Calcosita	0,00
Gangas	99,01

Fuente: Elab. Propia

Foto 4 Observamos las partículas libres de pirita (py) y de gangas (GGS).

Partícula entrelazada de goethita (gt) y gangas (GGs)
Magnificación: 500X



Fuente: Elaboración propia

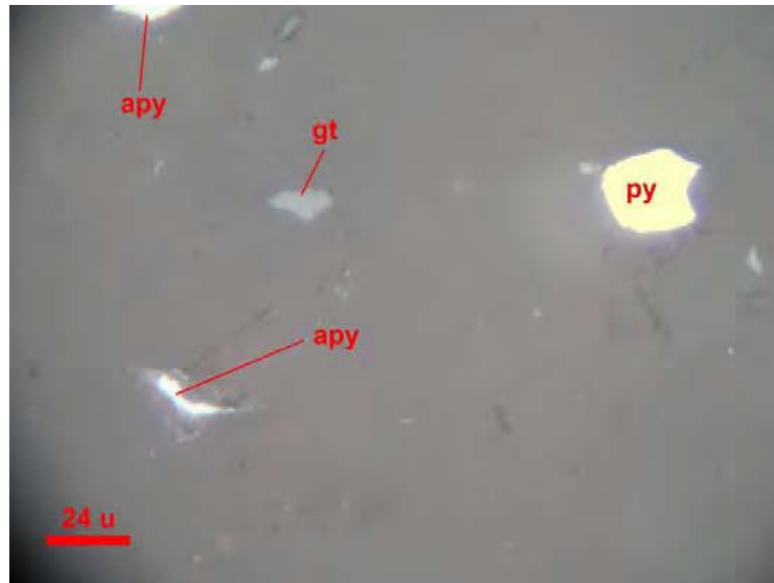
Foto 5 Se observa partículas libres de arsenopirita (apy) y de goethita(gt).
Magnificación: 500X



Fuente: Elaboración propia

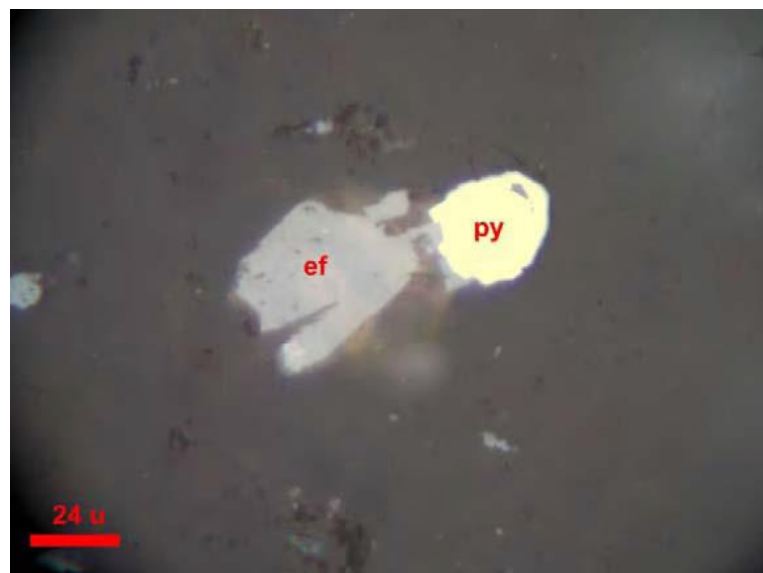
Foto 6 Se observan partículas libres de arsenopirita (apy),

Pirita (py) y goethita (gt). Magnificación: 500X



Fuente: Elaboración propia

Foto 7 Se observa una partícula entrelazada de esfalerita (ef) con pirita (py). Magnificación: 500X



Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Pruebas de concentración centrífuga Falcon

a) Primera prueba de concentración centrífuga Falcon

Tabla 14 Balance metalúrgico - concentrador Falcon

PRODUCTO	Gr	% PESO	LEYES		CONTENIDO FINOS		% RECUPERACIÓN	
			Au (gr/TM)	Ag (oz/TM)	Au (mgr)	Ag (oz)	Au	Ag
Concentrado	168,89	3,38	63,68	79,38	10,75	13,41	42,68	30,08
Relave	4831,11	96,62	2,99	6,45	14,45	31,16	57,32	69,92
Cabeza Calculada	5000	100	5,04	8,91	25,2	44,57	100	100
Cabeza Ensayada			6,61	11,22	% RECUPERACIÓN		42,68	30,08
					RATIO CONCENTRACIÓN		29.61	

b) Segunda prueba de concentración centrífuga Falcon

Tabla 15 Balance metalúrgico – concentrador Falcon

PRODUCTO	Gr	% PESO	LEYES		CONTENIDO FINOS		% RECUPERACIÓN	
			Au (gr/TM)	Ag (oz/TM)	Au (mgr)	Ag (oz)	Au	Ag
Concentrado	163,65	3,27	119,5	57,42	19,56	9,4	64,87	16,42
Relave	4836,35	96,73	2,19	9,89	10,59	47,83	35,13	83,58
Cabeza Calculada	5000	100	6,03	11,45	30,15	57,23	100	100
Cabeza Ensayada			6,61	11,22	% RECUPERACIÓN		64,87	16,42
					RATIO CONCENTRACIÓN		30,55	

4.1.3. PRUEBAS DE CIANURACIÓN

Tabla 16 Balance metalúrgico de cianuración en botella - test 1

PRODUCTO	PESO	LEYES		CONTENIDO FINO		% RECUPERACIÓN	
		Au (mgr/l) (gr/TM)	Ag (mgr/l) (Oz/TM)	Au (mgr)	Ag (oz)	Au	Ag
Soluc. Rica (ml)	600	1,67	63,84	1	1,35	62,55	39,03
Relave (gr)	300	2	7,02	0,6	2,11	37,45	60,97
Cabeza Calculada	300	5,34	11,51	1,6	3,45	100	100
Cabeza Ensayada		6,61	11,22	% RECUPERACIÓN		62,55	39,03

Tabla 17 Balance metalúrgico de cianuración en botella - test 2

PRODUCTO	PESO	LEYES		CONTENIDO FINO		% RECUPERACIÓN	
		Au (mgr/l) (gr/TM)	Ag (mgr/l) (Oz/TM)	Au (mgr)	Ag (oz)	Au	Ag
Soluc. Rica (ml)	600	1,81	75,32	1,09	1,59	67,92	43,45
Relave (gr)	300	1,71	6,9	0,51	2,07	32,08	56,55
Cabeza Calculada	300	5,33	12,2	1,6	3,66	100	100
Cabeza Ensayada		6,61	11,22	% RECUPERACIÓN		67,92	43,45

Tabla 18 Balance metalúrgico de cianuración en botella - test 3

PRODUCTO	PESO	LEYES		CONTENIDO FINO		% RECUPERACIÓN	
		Au (mgr/l) (gr/TM)	Ag (mgr/l) (Oz/TM)	Au (mgr)	Ag (moz)	Au	Ag
Soluc. Rica (ml)	600	2,63	78,23	1,58	1,65	76,45	44,46
Relave (gr)	300	1,62	6,88	0,49	2,06	23,55	55,54
Cabeza Calculada	300	6,88	12,39	2,06	3,72	100	100
Cabeza Ensayada		6,61	11,22	% RECUPERACIÓN		76,45	44,46

Tabla 19 Balance metalúrgico de cianuración en botella - test 4

PRODUCTO	PESO	LEYES		CONTENIDO FINO		% RECUPERACIÓN	
		Au (mgr/l) (gr/TM)	Ag (mgr/l) (Oz/TM)	Au (mgr)	Ag (moz)	Au	Ag
Soluc. Rica (ml)	600	2,49	81,16	1,49	1,71	77,33	46,18
Relave (gr)	300	1,46	6,66	0,44	2	22,67	53,82
Cabeza Calculada	300	6,44	12,37	1,93	3,71	100	100
Cabeza Ensayada		6,61	11,22	% RECUPERACIÓN		77,33	46,18

Tabla 20 Balance metalúrgico de cianuración en botella - test 5

PRODUCTO	PESO	LEYES		CONTENIDO FINO		% RECUPERACIÓN	
		Au (mgr/l) (gr/TM)	Ag (mgr/l) (Oz/TM)	Au (mgr)	Ag (moz)	Au	Ag
Soluc. Rica (ml)	600	2,68	87,07	1,61	1,84	81,21	52,2
Relave (gr)	300	1,24	5,63	0,37	1,69	18,79	47,8
Cabeza Calculada	300	6,6	11,78	1,98	3,53	100	100
Cabeza Ensayada		6,61	11,22	% RECUPERACIÓN		81,21	52,2

4.2. PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE

RESULTADOS

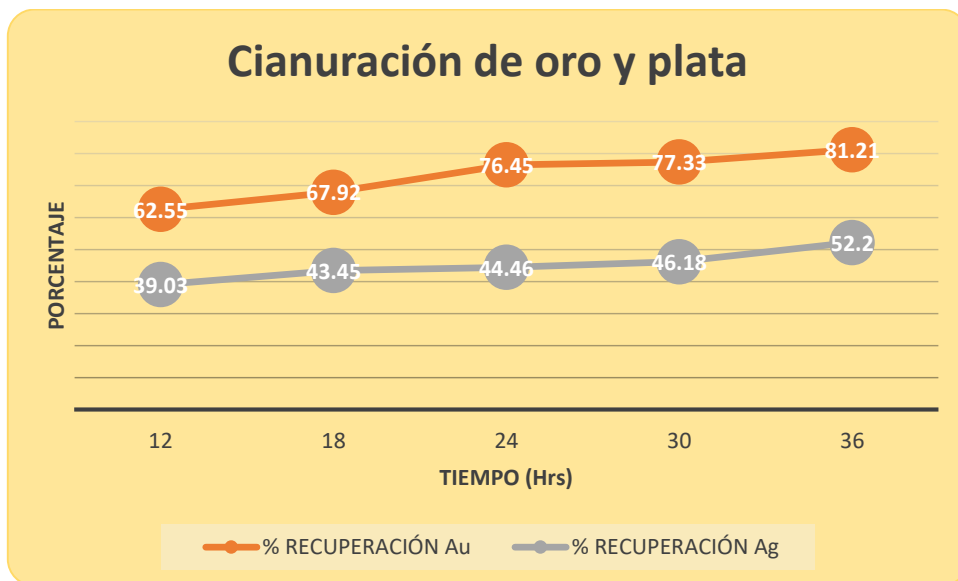
En la tabla siguiente, se muestra los resultados obtenidos de las pruebas de cianuración realizadas a diferentes horas.

Tabla 21 Proceso de cianuración

TIEMPO (Hr)	% RECUPERACIÓN	
	Au	Ag
12	62,55	39,03
18	67,92	43,45
24	76,45	44,46
30	77,33	46,18
36	81,21	52,20

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 5. Cianuración de oro y plata



Fuente: Elaboración propia.

4.3. PRUEBA DE HIPÓTESIS

Formulación de la hipótesis estadística

Dado que para el caso se trata de un modelo de causa efecto, realizó los experimentos necesarios:

Nivel de confianza: 95%

Error máximo: 5%

Diseño factorial de múltiples niveles

Factores:	3	Réplicas:	1
Corridas base:	27	Total de corridas: 27	27
Bloques base:	1	Total de bloques:	1

Regresión factorial general: % Recup vs. Malla; Consumo de NaCN; Densidad

No se pueden estimar los siguientes términos y se eliminaron:

Consumo de NaCN; Densidad; Malla*Consumo de NaCN; Malla * Densidad; Consumo de NaCN * Densidad; Malla * Consumo de NaCN * Densidad

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Malla	3:	100; 150; 200

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	2	29,6480	14,8240	29,06	0,130
Lineal	2	29,6480	14,8240	29,06	0,130
Malla	2	29,6480	14,8240	29,06	0,130
Error	1	0,5100	0,5100		
Total	3	30,1581			

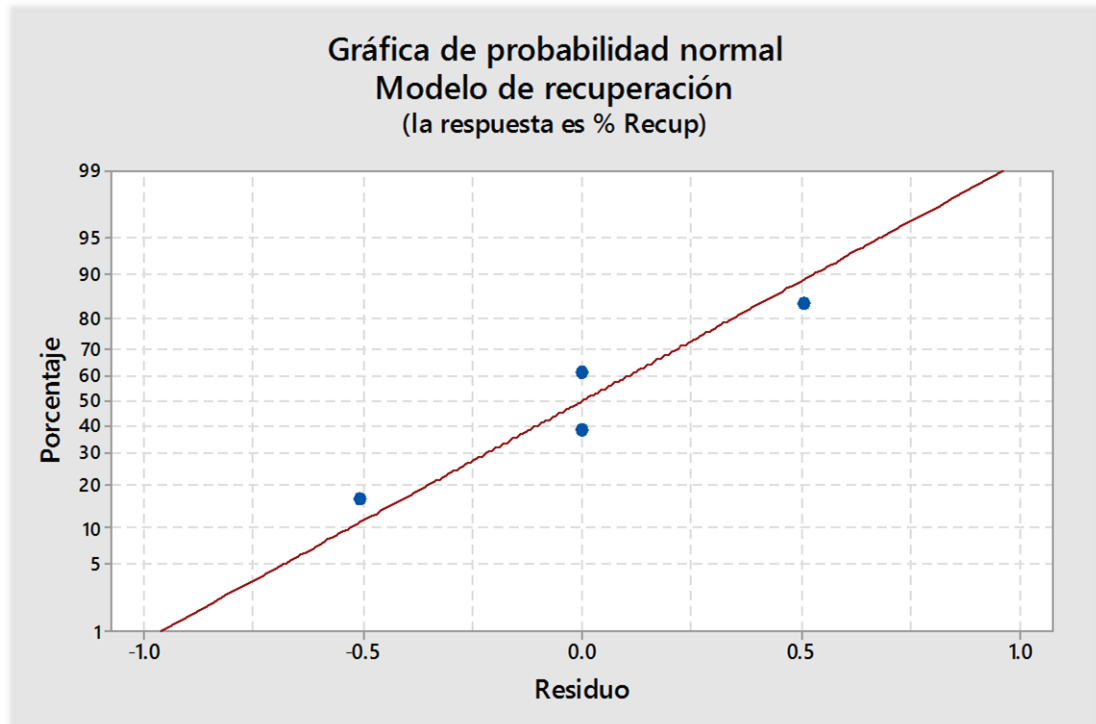
Resumen del modelo

		R-cuad.	R-cuad.
S	R-cuad.	(ajustado)	(pred)
0,714178	98,31%	94,93%	*

En mi caso la ecuación de ajuste se obtuvo una correlación de R= 94% de dependencia entre el grado de recuperación y la malla a la cual se le hizo el experimento ofreciendo una alta recuperación.

Coeficientes

	EE del			
Término	Coef	coef.	Valor T	Valor p
Constante	80,668	0,376	214,31	0,003



La curva de ajuste nos muestra una relación causa efecto muy alto entre las dos variables importantes como son: Granulometría y Recuperación para los dos elementos de nuestro estudio, al 95% de confianza.

4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.4.1. Características de la muestra

Mineral a +200 mallas

De acuerdo a las tablas 10 y 11 que se exhibe líneas arriba, la interpretación de los grados de liberación es como sigue:

- La esfalerita ocupa 0,30% del volumen total de la muestra. De este volumen el 100% se halla libre, indicándose que no se observa partículas entrelazadas.

- La pirita ocupa el 4,60% del volumen total de la muestra. De este volumen, el 99,65% se halla libre, mientras que el 0,35% restante se encuentra aún entrelazado debido a los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos entre los cuales están inmersos.
- La pirrotita ocupa el 0,44 % del volumen total de la muestra. De este volumen el 100% se halla libre por estar liberado.
- La marcasita ocupa el 0,19 % del volumen total de la muestra. De este volumen, el 76,92% se halla libre; mientras que el 23,08 % restante se encuentra aún entrelazado.
- La arsenopirita ocupa el 5,81 % del volumen total de la muestra. De este volumen, el 94,15% se halla libre, mientras que el 5,85 % restante se encuentra aún entrelazado.
- La goethita ocupa el 8,42% del volumen total de la muestra. De este volumen, el 96,46 % se halla libre, mientras que el 3,54% restante se encuentra aún entrelazado.
- Las gangas ocupan el 80,25% del volumen total de la muestra. De este volumen, el 98,29% se halla libre, mientras que el 1,71% restante se encuentra aún entrelazado.

a) Mineral a -200 mallas

Según las tablas 12 y 13 exhibidas líneas arriba, la interpretación de los grados de liberación es como sigue:

- La esfalerita ocupa 0,69% del volumen total de la muestra. De este volumen, el 100% se halla libre, sin evidenciar partículas entrelazadas dentro del proceso de análisis microscópico.
- La calcopirita ocupa el 0,02% del volumen total de la muestra. De este volumen el 100% restante se encuentra entrelazado.
- La pirita ocupa el 3,25% del volumen total de la muestra. De este volumen, el 99,29% se halla libre, mientras que el 0,71% restante se encuentra aún entrelazado. El motivo de su no liberación total está dado por los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos entre los cuales están inmersos.
- La marcasita ocupa el 1,84 % del volumen total de la muestra, de este volumen el 100% se halla libre, lo que indica que la totalidad de las partículas están libres, por tanto, su grado de liberación es de 100%.
- La arsenopirita ocupa el 9,63 % del volumen total de la muestra. De este volumen el 95,69% se halla libre, mientras que el 4,31 % restante se encuentra aún entrelazado.
- La goethita ocupa el 35,48% del volumen total de la muestra. De este volumen el 100% se halla libre, lo que indica que la totalidad de las partículas están libres, por tanto, su grado de liberación es de 100%.
- Las gangas ocupan el 48,87% del volumen total de la muestra. De este volumen, el 99,01% se halla libre, mientras que el 0,99% restante se encuentra aún entrelazado.

4.4.2. Pruebas de concentración centrífuga

En la primera prueba realizada del concentrador centrífugo Falcon los resultados que se obtuvieron fueron de una recuperación de Au = 42,68% y una recuperación de Ag = 30,08%, con una ley de concentrado de Au = 63,68 gr. /TM y de Ag = 79,38 Oz/TM.

Ello demuestra la tendencia de las partículas valiosas a encontrarse finamente diseminadas en los sulfuros.

La granulometría, para la prueba de concentración centrífuga Falcon fue de 55% -200 mallas, lo cual parece insuficiente para alcanzar los resultados esperados.

En la segunda prueba realizada de concentración centrífuga Falcon, los resultados indican que se obtuvieron una recuperación de Au = 64,87% y una recuperación de Ag = 16,42% con una ley de concentrado de Au = 119,5 gr./TM y de Ag = 57,42 oz. /TM. Estos resultados fueron bastante aceptables en cuanto a grado y recuperación para el oro, dado que su recuperación se incrementó en 22,19% en comparación con la primera prueba de concentración centrífuga Falcon. Pero en el caso de la plata se produjo complicaciones debido a que hubo una pérdida en cuanto a recuperación de 13,66%.

4.4.3. Pruebas de cianuración

Las pruebas de cianuración, se realizaron como proceso alternativo para ver la respuesta de mineral al proceso tradicional de Lixiviación del oro. Se pudo apreciar en la prueba que la cinética de

extracción es rápida dentro de las 24 horas para el oro (llegando a 76,45% de recuperación). Para el caso de la plata se obtuvo bajas recuperaciones, inclusive con 36 horas de cianuración el resultado fue de 49,86%. El consumo de cianuro está dentro de los 2 Kg/TM y la cal dentro de los 20 Kg /TM Observamos que, en 36 horas de cianuración, se obtuvo una recuperación de 81,21 %, para el Au, lo cual significa que se puede extender el tiempo de cianuración a 36 horas y/o el 100% de molienda a malla -200.

CONCLUSIONES

1. El estudio de microscopia realizado a la muestra a 500 ampliaciones, se observa sulfuros de plomo, cinc, hierro y gangas silicatadas libres, sometiendo a molienda el 100% a mallas -200, lo cual permitiría dejar libre al oro y la plata; la diferencia es la asociación de la plata con otros elementos entre ellos los sulfuros simples y completos que limitan altas recuperaciones.
2. Realizando una etapa de pre concentración y utilizando el concentrador centrífugo Falcon para este tipo de minerales, al oro grueso, se logran obtener resultados metalúrgicos de 42,68 y 64,87 % para el oro y 30,08 y 16,42% para la plata, debido a la granulometría a que se procesó.
3. Con la cianuración directa para 36 horas se obtiene una recuperación de 8121% para el oro. En cambio, para la plata se obtuvo una recuperación baja pues solo llega a 52,20 %, al parecer existe oro fino y a la granulometría cianurada, se ha liberado de los sulfuros; que por cierto requiere mayor análisis al comportamiento mineralógico, para comprender las dificultades para la recuperación de oro. En cambio en la plata por su propia naturaleza de estar asociado, las recuperaciones no serán altas.

RECOMENDACIONES

1. Se sugiere realizar estudios de microscopía electrónica de barrido y electrónica de transmisión, para determinar la estructura cristalina y en que mineral está incluido el oro.
2. Realizar estudios de microscopía electrónica de transmisión de concentrados de oro y plata obtenidos en el procesador Falcon, para analizar la granulometría del oro y su mineralogía.
3. Analizar los relaves del proceso de cianuración para mejorar las recuperaciones de oro.

BIBLIOGRAFIA

- Addison, R. (1986). Gold and Silver Extraction from Sulfides ores. *Mining Congress Journal* (págs. 47 - 54). Melbourne: Congress.
- Argall, G. (1984). Precious Metals Extraction. *International Mining* (págs. 32 - 44). Utha: Congress.
- Bergamashi, G. (1987). *Oro*. Madrid - España: Mondadori.
- Cánepa, C. (1992). *Mineralogía del Oro y su significación en Metalurgia*. Lima: Tecsup.
- Dana, J. (1992). *Mineralogía de Dana*. Madrid - España: Reverte.
- Dorr, J. (1956). *Cyanidation and Concentration of Gold and Silver Ores*. New York: McGraw-Hill.
- Filmer, A. (1982). The Dissolution of Gold from roasted Pyrite Concentrates. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy* (págs. 90 - 94). Johanesbrugo: Journal Institute.
- Hurtado, H. (2003). *Oro oculto en el Perú*. Lima: UNAS.
- Misari, F. (2010). *Metalurgia del Oro*. Lima: CEPETEC.
- Smith, K. (2005). *Manual del Falcon Concentrator*. Australia: Falcon.
- Van, M. (2006). Nuevas Aplicaciones de Concentración Centrífuga. *VI Simposio Internacional de Mineralurgia*. Lima: Tecsup.
- Varios. (2008). Compañías mineras productoras de Oro en el Mundo y el Perú. *Mundo Minero*, págs. 70 - 72.
- Varios. (2008). Conferencias. *VIII Simposium Internacional del Oro* (pág. 257). Lima: SNMP.

Wills, B. A. (1991). *Mineral Processing Technology*. Mexico: Pergamon Press.

ANEXOS

INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Pruebas de concentración centrífuga Falcon

PRODUCTO	Gr	% PESO	LEYES		CONTENIDO FINOS		% RECUPERACIÓN	
			Au (g/TM)	Ag (oz/TM)	Au (mg)	Ag (oz)	Au	Ag
Concentrado								
Relave								
Cabeza Calculada								
Cabeza Ensayada					% RECUPERACIÓN			
					RATIO CONCENTRACIÓN			

Pruebas de cianuración

PRODUCTO	PESO	LEYES		CONTENIDO FINO		% RECUPERACIÓN	
		Au (mg/l) (gr/TM)	Ag (mg/l) (Oz/TM)	Au (mg)	Ag (oz)	Au	Ag
Soluc. Rica (ml)							
Relave (gr)							
Cabeza Calculada							
Cabeza Ensayada				% RECUPERACIÓN			

MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES
<p>General ¿Cómo desarrollar la caracterización y tratamiento por cianuración de sulfuros para la recuperación de oro en Quío – Ambo - Huánuco – 2019?</p>	<p>General Desarrollar un modelo de caracterización y tratamiento por cianuración de sulfuros para la recuperación de oro en Quío – Ambo – Huánuco – 2019.</p>	<p>General Si desarrollamos un modelo de caracterización y tratamiento por cianuración de los sulfuros, entonces; influirá en la recuperación de oro en Quío – Ambo - Huánuco – 2019.</p>	<p>Dependiente % Recuperación de oro</p>
<p>Específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • ¿Cuál es la caracterización mineralógica de los sulfuros en el prospecto minero en Quío – Ambo – Huánuco - 2019? • ¿De qué manera las variables: densidad de pulpa, Grado de liberación y velocidad de rotación del agitador influye en la recuperación de oro en Quío – Ambo – Huánuco – 2019? 	<p>Específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Determinar y desarrollar el modelo de caracterización mineralógica de los sulfuros en el prospecto minero en Quío – Ambo – Huánuco - 2019. • Evaluar las variables: densidad de pulpa, Grado de liberación y velocidad de rotación del agitador en la recuperación de oro en Quío – Ambo - Huánuco – 2019. 	<p>Específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Si determinamos el modelo de caracterización mineralógica de los sulfuros, entonces, influirá en la recuperación de oro en Quío – Ambo – Huánuco – 2019. • Si determinamos el rango de trabajo óptimo de las variables: densidad de pulpa, grado de liberación y velocidad de rotación del agitador entonces influirá en la recuperación de oro en Quío – Ambo – Huánuco – 2019. 	<p>Independientes</p> <ul style="list-style-type: none"> • Densidad de pulpa • Grado de liberación de oro • Velocidad de rotación del agitador.