

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



TESIS

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE CIANURACIÓN DE MENAS
AURÍFERAS PIRÍTICAS EN LA PLANTA DE BENEFICIO DE LA
UNIDAD MINERA AIDITA**

PRESENTADO POR:

Br. GABRIEL DIONICIO RODRIGUEZ SUTTA

Br. VICTOR MANUEL HUAYLLANI TAIPE

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO METALÚRGICO**

ASESOR DE TESIS:

Mgt. VICTOR MELECIO DUEÑAS AQUISE

CUSCO-PERÚ

2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro. CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada: Optimización del Proceso de Ganuración de Menas Auríferas Piríticas en la Planta de Beneficio de la Unidad Minera Aída

presentado por: Victor Manuel Huayllani Tarpe con DNI Nro. 71619947 presentado por: Gabriel Dionicio Rodriguez Sulta con DNI Nro.: 75190723 para optar el título profesional/grado académico de Ingeniero Metalúrgico

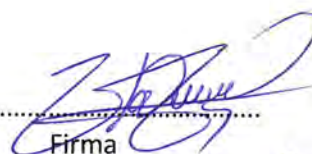
Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 1 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 9 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 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, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 20 de Febrero de 2026



Firma

Post firma: Victor Melecio Dueñas Aquise

Nro. de DNI: 29378517

ORCID del Asesor: 0000-0002-6459-9804

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259:558726416

Gabriel Dionicio_Victor Manuel Rodriguez Sutta_H...

TESIS RODRIGUEZ-HUAYLLANI.docx

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:558726416

Fecha de entrega

19 feb 2026, 4:14 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

19 feb 2026, 4:31 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS RODRIGUEZ-HUAYLLANI.docx

Tamaño del archivo

14.6 MB

119 páginas

17.991 palabras

97.545 caracteres

9% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 8%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 6%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo optimizar la extracción de oro a partir de mineral aurífero pirítico mediante el proceso de cianuración, evaluando la influencia de variables operativas clave. Consideraron como variables independientes a la concentración de cianuro (A) y el tiempo de cianuración (B), y como variable dependiente el porcentaje de extracción de oro.

La investigación se desarrolló a nivel experimental, mediante la realización de pruebas de laboratorio diseñadas bajo un esquema factorial 2^2 . Los ensayos permitieron analizar el efecto individual y combinado de las variables estudiadas sobre la eficiencia del proceso de cianuración.

Los resultados obtenidos indican que una concentración de cianuro de 2,578 % y un tiempo de cianuración de 3 días permiten alcanzar una extracción de oro del 82 %. El análisis estadístico evidenció que ambas variables presentan una influencia significativa en el proceso. Asimismo, a partir de los datos experimentales se obtuvo un modelo cinético para la extracción de oro el cual será detallado ampliamente en capítulos siguientes.

Se concluye que es posible optimizar la extracción de oro a partir de menas auríferas piríticas mediante el control adecuado de la concentración de cianuro y el tiempo de cianuración, lo que contribuye a mejorar la eficiencia del proceso metalúrgico.

Palabras clave: **Cianuración, Concentración de cianuro de sodio, Mineral aurífero, Optimización.**

ABSTRACT

The objective of this research was to optimize gold extraction from pyritic gold-bearing ore through the cyanidation process by evaluating the influence of key operating variables. The independent variables considered were cyanide concentration (A) and cyanidation time (B), while the dependent variable was the percentage of gold extraction.

The study was conducted at an experimental level through laboratory tests designed under a 2^2 factorial scheme. These tests allowed the analysis of the individual and combined effects of the variables studied on the efficiency of the cyanidation process.

The results indicate that a cyanide concentration of 2.578% and a cyanidation time of 3 days allow achieving a gold extraction of 82%. Statistical analysis showed that both variables have a significant influence on the process. In addition, a kinetic model for gold extraction was obtained from the experimental data, which is described in detail in subsequent chapters.

It is concluded that gold extraction from pyritic gold ores can be optimized through appropriate control of cyanide concentration and cyanidation time, thereby improving the efficiency of the metallurgical process.

Keywords: Cyanidation, Sodium cyanide, Concentration, Gold ore, Optimization.

INTRODUCCIÓN

El sector metalúrgico extractivo es una actividad económica clave del país, destacando el oro por su alto valor comercial y demanda internacional. Para su recuperación, la industria minera emplea diversos procesos metalúrgicos, siendo la cianuración uno de los métodos más utilizados por su eficiencia.

La eficiencia del proceso de cianuración depende del adecuado control de las variables operativas. Un control inadecuado de parámetros como la dosificación de reactivos y el tiempo de residencia puede ocasionar bajos niveles de extracción, mayores costos y un uso ineficiente de insumos químicos.

Optimizar el proceso de cianuración es fundamental para mejorar la recuperación de oro, reducir costos y minimizar impactos ambientales. Además, el estudio aporta información técnica relevante que contribuye a la mejora de procesos metalúrgicos y al fortalecimiento del conocimiento técnico y académico en el área.

El objetivo principal es optimizar la extracción de oro mediante el proceso de cianuración. Se busca analizar el efecto de la concentración de cianuro de sodio y el tiempo de cianuración con el fin de incrementar la extracción de oro, y por maximizar su recuperación. La investigación se limita a pruebas experimentales de laboratorio aplicadas a mineral aurífero pirítico de la Unidad Minera Aidita, considerando únicamente la concentración de cianuro de sodio y el tiempo de cianuración como variables de estudio.

El estudio se desarrolló mediante un diseño experimental factorial 2^2 para evaluar el efecto individual y combinado de las variables. El trabajo está organizado en capítulos que incluyen el marco teórico, la metodología, el análisis de resultados y las conclusiones finales.

DEDICATORIA

A mi amada hija Emilia, cuya sonrisa y alegría iluminan cada día de mi vida. Eres mi mayor inspiración y motivo para seguir adelante. A mi querida novia Fiorella, por tu amor incondicional, tu paciencia y tu apoyo constante en cada paso de este camino. Gracias por creer en mí y por estar siempre a mi lado.

A mis padres y familiares, por su sacrificio, sabiduría y ejemplo. Agradezco profundamente su apoyo y confianza en mí, sin los cuales este logro no habría sido posible.

Gabriel D. Rodríguez Sutta

En agradecimiento a mi adorada madre quien ha sido mi inspiración durante todo este trayecto. A mi apreciado hermano gracias a su guía, consejo y apoyo que me ha impulsado a seguir cumpliendo con todos mis objetivos.

A mis familiares y amigos, quienes han sido partícipes de cada etapa en mi crecimiento personal y profesional. A cada uno de ustedes les dedico este logro y desde el fondo de mi corazón agradezco su compañía, confianza y consejo.

Victor Manuel Huayllani Taipe

RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN	3
DEDICATORIA	4
ÍNDICE DE TABLAS	11
ÍNDICE DE FIGURAS.....	13
LISTA DE SÍMBOLOS Y TÉRMINOS	14
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.1. Situación problemática.....	15
1.2. Formulación del problema	17
1.2.1. General.....	17
1.2.2. Específicos	17
1.3. Justificaciones	18
1.3.1. Económica	18
1.3.2. Tecnológica.....	18
1.3.3. Social	18
1.3.4. Medio ambiental	19
1.4 Objetivos	20
1.4.1. General.....	20

1.4.2. Específicos	20
CAPITULO II MARCO TEÓRICO	21
2.1. Estado del arte (antecedentes).....	21
2.1.1. Antecedente local.....	21
2.1.2. Antecedente nacional	22
2.1.3. Antecedentes internacionales.....	23
2.2. Bases teóricas.....	24
2.2.1. El oro.....	24
2.2.1.1. Ocurrencias del oro	24
2.2.1.3. Causa de la refractariedad	26
2.2.2. Muestreo	28
2.2.3. Molienda	29
2.2.3.1. Factores que afectan la molienda de los minerales auríferos	30
2.2.3.2. Estrategias para mejorar la molienda de minerales auríferos.....	31
2.2.4. Hidrometalúrgia	31
2.2.4.1. Lixiviación	32
2.2.4.2. Generalidades de la disolución del oro	32
2.2.4.3. Cianuración del oro	32
2.2.4.4. Técnicas de cianuración del oro	35

2.2.4.5. Variables de la cianuración del oro	40
2.2.4.6. Cinética de la cianuración del oro	44
2.2.4.7. Termodinámica de la cianuración del oro	51
2.2.4.8. Cianuración de minerales refractarios	58
CAPITULO III HIPÓTESIS Y VARIABLES	60
3.1. Hipótesis	60
3.1.1. General	60
3.1.2. Específicas	60
3.2. Variables	60
3.2.1. Variable dependiente	60
3.2.2. Variables independientes	60
3.3. Operacionalización de variables	61
CAPÍTULO IV METODOLÓGIA	62
4.1. Ámbito del estudio	62
4.1.1. Geología de la concesión	63
4.2. Diseño de la investigación	63
4.2.1. Tipo y nivel de investigación	64
4.3. Población de estudio	65
4.3.1. Tamaño de muestra	65

4.3.2. Técnicas e instrumentos de toma de datos.....	66
4.3.2.1. Técnica (técnica de recolección de datos).....	66
4.3.2.2. Instrumentos, equipos y materiales	67
4.5. Análisis de datos	67
4.6. Alcances y limitaciones	67
CAPÍTULO V	68
PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	68
5.1. Muestreo	69
5.2. Preparación mecánica del mineral	70
5.3. Análisis químico del mineral	70
5.4. Caracterización mineralógica.....	70
5.5. Molienda	73
5.6. Determinación de gravedad específica	74
5.7. Prueba preliminar de cianuración	75
5.8. Desarrollo experimental de las pruebas de cianuración en baldes de agitación	76
CAPITULO VI RESULTADOS Y DISCUSIÓN	78
6.1. Determinación de la gravedad específica	78
6.2. Determinación de tiempo de molienda	78
6.3. Prueba preliminar de cianuración	81

6.4. Pruebas según el diseño experimental 2^2	83
6.4.1. Análisis estadístico de los resultados de las pruebas experimentales	85
6.4.1.1. Análisis de varianza	88
6.4.1.2. Modelo estadístico	89
6.4.1.3. Optimización de respuestas	90
CONCLUSIONES	94
RECOMENDACIONES	95
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
ANEXOS	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ocurrencias del oro	25
Tabla 2 Mineralogía de menas auríferas	25
Tabla 3 Comparativa de las técnicas de cianuración	36
Tabla 4 Matriz de operacionalización de variables.....	61
Tabla 5 Demarcaciones de la unidad minera Aidita	63
Tabla 6 Resultados del análisis de ley de oro en la alimentación (cabeza)	70
Tabla 7 Composición mineralógica del material puruñado	71
Tabla 8 Composición mineralógica de la veta superior del yacimiento	72
Tabla 9 Composición mineralógica de la veta inferior	72
Tabla 10 Condiciones operativas del molino estándar	73
Tabla 11 Condiciones operativas de la prueba de molienda.....	73
Tabla 12 Toma de datos para el cálculo de la gravedad específica	75
Tabla 13 Condiciones de la prueba de cianuración preliminar.....	75
Tabla 14 Control de prueba metalúrgica preliminar de cianuración.....	76
Tabla 15 Matriz de diseño factorial 2^2 con un punto central	76
Tabla 16 Variables y sus niveles operativos para las pruebas experimentales	77
Tabla 17 Condiciones operativas para las pruebas del diseño factorial.....	77
Tabla 18 Cálculo de la gravedad específica del mineral.....	78
Tabla 19 Datos obtenidos en la prueba de molienda	78
Tabla 20 Consumo de reactivos de cianuración	81
Tabla 21 Extracción de oro respecto al tiempo de cianuración	81
Tabla 22 Balance metalúrgico de la prueba preliminar de cianuración.....	82

Tabla 23 Resultados de las 5 pruebas experimentales	83
Tabla 24 Matriz de diseño factorial 2^2 a escala natural y codificada.....	84
Tabla 25 Efecto estimado para extracción de oro	85
Tabla 26 Análisis de varianza (ANOVA)	88
Tabla 27 Residuos de los valores obtenidos en el modelo.....	88
Tabla 28 Resumen del modelo estadístico.....	90
Tabla 30 Valores óptimos para un 82 % de extracción	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ocurrencias del oro.....	26
Figura 2 Diagrama de flujo típico de un circuito de cianuración en pilas	38
Figura 3 Tanque de agitación mecánica.....	40
Figura 4 Cinética de extracción de Au y consumo de cianuro	45
Figura 5 Diagrama Eh – pH sistema Au – SCN – H ₂ O a condiciones normales.....	54
Figura 7 Representación esquemática de la disolución de oro	57
Figura 8 Ubicación geográfica - planta de la Unidad Minera Aidita.....	62
Figura 9 Diagrama de flujo del desarrollo experimental	68
Figura 10 Protocolo de muestreo para mineral de oro	69
Figura 11 Muestra concentrada manualmente	71
Figura 12 Gráfica de regresión lineal del tiempo de molienda vs porcentaje pasante.....	79
Figura 13 Gráfica de predicción para el tiempo óptimo de molienda.....	80
Figura 14 Gráfica de la cinética de la cianuración para la prueba preliminar	82
Figura 15 Gráfica de cubos de extracción de oro	85
Figura 16 Diagrama de Pareto	86
Figura 17 Gráfica de efectos principales para la extracción de oro	87
Figura 18 Gráfica de efectos estandarizado	87
Figura 19 Gráfica de interacción de variables	89
Figura 20 Gráfica de predicción	91
Figura 21 Gráfica de contorno de extracción de oro.....	91
Figura 22 Gráfica de contorno restringido.....	92
Figura 23 Gráfica de superficie para la extracción de oro	93

LISTA DE SÍMBOLOS Y TÉRMINOS

A	Concentración de cianuro
B	Tiempo de cianuración
ac	Acuoso
°C	Celsius
CIL	Carbón in leach
CIP	Carbón in Pulp
CIC	Carbón en columna
ΔG°	Variación de energía libre
ΔH°	Variación de Entalpia
E°	Potencial
g/TM	Gramos por tonelada métrica
G.E.	Gravedad específica
NaCN	Cianuro de Sodio
ppm	Partes por millón
ρ	Densidad
RPM	Revoluciones por minuto
(s)	Sólido
t	tiempo
TM	Toneladas Métricas
W	Peso

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Situación problemática

La industria metalúrgica aurífera enfrenta de manera permanente el desafío de mejorar la eficiencia y rentabilidad de sus operaciones, especialmente cuando se trata del procesamiento de menas complejas, como las auríferas piríticas. Este tipo de minerales presenta dificultades particulares durante su tratamiento metalúrgico debido a la forma en que el oro se encuentra asociado a minerales sulfurados. En este contexto, la planta de beneficio de la Unidad Minera Aidita procesa minerales auríferos piríticos, lo que representa un reto importante para la optimización del proceso metalúrgico, principalmente en la etapa de cianuración.

Las menas auríferas piríticas son consideradas generalmente como refractarias, debido a que el oro se encuentra encapsulado en sulfuros o asociado a minerales como la pirita y la arsenopirita, lo que dificulta su contacto con las soluciones cianuradas. Asimismo, la presencia de minerales que consumen cianuro o inhiben la disolución del oro reduce la eficiencia del proceso. Como consecuencia, la aplicación de métodos convencionales de cianuración suele generar bajos porcentajes de extracción y un consumo elevado de reactivos, afectando de manera negativa el rendimiento del proceso y la economía de la operación.

En la planta de beneficio de la Unidad Minera Aidita se emplea actualmente el proceso de cianuración por agitación; sin embargo, el porcentaje de extracción de oro obtenido es aproximadamente del 70 %, valor que resulta bajo para este tipo de proceso, considerando que un nivel de extracción económicamente rentable se alcanza cuando los valores son iguales o

superiores al 85 % (Misari, 2010). Esta situación pone en evidencia un déficit en la recuperación de oro, el cual incide directamente en el aumento de los costos operativos y en la disminución de la competitividad de la empresa.

El bajo porcentaje de extracción de oro se atribuye principalmente a la presencia de minerales refractarios y sulfurados, a un blending inadecuado del mineral y a la falta de un grado de molienda apropiado. Estas condiciones provocan un consumo excesivo de reactivos como el cianuro de sodio y el hidróxido de sodio, especialmente debido a la presencia de minerales de cobre considerados cianógenos, lo que incrementa los costos de operación y genera mayores riesgos ambientales.

En consecuencia, la problemática central de la presente investigación se relaciona con la deficiente extracción de oro durante el proceso de cianuración de menas auríferas piríticas en la planta de beneficio de la Unidad Minera Aidita. Frente a esta situación, surge la necesidad de optimizar las variables del proceso de cianuración, enfocándose netamente en el tiempo de cianuración y la concentración de cianuro de sodio con el propósito de incrementar los porcentajes de extracción de oro, mejorar la eficiencia del proceso metalúrgico y contribuir al desarrollo de una operación más rentable y sostenible.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. General

¿Se podrá optimizar la extracción de oro a partir de los minerales piritosos por medio de la evaluación de variables del proceso de cianuración por agitación en la planta de beneficio de la Unidad Minera Aidita?

1.2.2. Específicos

- ¿Cuál es la concentración de cianuro de sodio que permita incrementar la extracción de oro a partir de los minerales piritosos por medio del proceso de cianuración por agitación en la planta de beneficio de la Unidad Minera Aidita?
- ¿Cuál es el tiempo de cianuración que permita incrementar la extracción de oro a partir de los minerales piritosos por medio del proceso de cianuración por agitación en la planta de beneficio de la Unidad Minera Aidita?

1.3. Justificaciones

1.3.1. Económica

Las menas auríferas piríticas son a menudo refractarias, lo que se traduce en bajos porcentajes de extracción de oro y un consumo antieconómico de reactivos. La investigación contribuirá directamente al aumento de la extracción del metal valioso, lo que se espera maximice los resultados metalúrgicos y, por consiguiente, la rentabilidad de la empresa. Además, al optimizar el uso de reactivos como el cianuro, se logrará una reducción significativa de los costos de operación, garantizando la viabilidad económica del proyecto a menor costo. (Lira, 2021)

1.3.2. Tecnológica

La investigación busca perfeccionar los procesos existentes y adoptar soluciones avanzadas para el beneficio de minerales complejos. Es fundamental el estudio permanente de las variables operacionales para alcanzar resultados más eficientes, así como la aplicación de diseños experimentales para evaluar las variables clave, permitirá a la Unidad Minera Aidita superar las falencias en la extracción del oro. (Lira, 2021)

1.3.3. Social

De incrementar la extracción de oro, podremos ver un aumento sustancial en el requerimiento de mano de obra directa e indirecta, esto tendrá un impacto positivo en la población, dando prioridad a la salud y el bienestar de las personas, de lograrse los objetivos planteados, la empresa tendría un mejor ingreso económico, en consecuencia, se podrá mejorar

los términos de las negociaciones y pactos colectivos con el poblado, siendo así el beneficio económico aumentaría para el centro poblado de Huarasaca. (Lira, 2021)

1.3.4. Medio ambiental

La problemática de las menas piríticas refractarias implica riesgos significativos debido a su naturaleza y a las prácticas de cianuración. Las operaciones actuales, sin una optimización adecuada, pueden generar bajos porcentajes de extracción de oro y un consumo antieconómico de reactivos, lo que no solo afecta la economía, sino que incrementa la huella ambiental. Teniendo en cuenta la normativa medioambiental, es prudente emplear las sustancias químicas, como el cianuro de sodio, de forma eficiente y racional, de este modo, podemos mitigar los problemas medioambientales, como la contaminación de agua, suelos, la disminución de la flora y la fauna locales. (Lira, 2021)

1.4 Objetivos

1.4.1. General

Optimizar la extracción de oro a partir de los minerales piritosos por medio de la evaluación de variables del proceso de cianuración por agitación en la planta de beneficio de la Unidad Minera Aidita

1.4.2. Específicos

- Determinar la concentración de cianuro de sodio que permita incrementar la extracción de oro a partir de los minerales piritosos por medio del proceso de cianuración por agitación en la planta de beneficio de la Unidad Minera Aidita.
- Determinar el tiempo de cianuración que permita incrementar la extracción de oro a partir de los minerales piritosos por medio del proceso de cianuración por agitación en la planta de beneficio de la Unidad Minera Aidita.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Estado del arte (antecedentes)

2.1.1. Antecedentes internacionales

Morales, (2011) realizó su tesis titulada “**Procesamiento de un mineral aurífero refractario polisaturado para la extracción de oro**” en dicho estudio se usó mineral aurífero refractario, el cual paso por distintas operaciones y procesos, la cianuración en cada etapa se realizó con los siguientes parámetros: concentración de cianuro=900 ppm, pH=11 y tiempo de cianuración=24 horas, se realizó una prueba preliminar donde se logró el 30% de extracción de oro, para poder incrementar el porcentaje de extracción se aplicó la operación de molienda, en donde se logró el 48%, como segunda etapa se concentró el mineral previamente molido por flotación para posteriormente ser cianurado en donde se obtuvo una extracción de oro del 78.5%, posteriormente se sometió a tostación el mineral concentrado, al cianurar dicha muestra se obtuvo el 85% de extracción, y como última etapa se realizó una lixiviación ácida al concentrado tostado con el propósito de extraer el cobre y hierro, para después pasar por la etapa de cianuración con dicha prueba se logró una extracción superior a las otras pruebas obteniendo el 91.07% de extracción de oro.

(Ruiz, López , Carmona, & Bolívar , 2019) en su artículo de investigación titulado “**Modelamiento estadístico y optimización del proceso de cianuración de un mineral aurífero**” se determinó la significancia de las variables y las condiciones ideales para maximizar la extracción de oro. Para ello, se usó un diseño experimental factorial 2^3 , con el fin de delimitar los parámetros óptimos de la cianuración, logrando una extracción de oro del 89.35% dicho

resultado se obtuvo bajo las siguientes condiciones: granulometría del mineral –200 mallas Tyler ($-75\ \mu$), concentración de NaCN de $2.5\ \text{g/m}^3$ y tiempo de lixiviación de siete horas. Esto validó que el diseño experimental es una herramienta crucial ya que facilita la identificación de los parámetros óptimos en el proceso de cianuración.

2.1.2. Antecedente nacional

(Mamani, 2015) en su tesis titulada **“Estudio de investigación para el procesamiento de minerales auríferos de la franja minera aurífera Nazca”** se realizó una serie de pruebas de caracterización de minerales de varios puntos pertenecientes a la franja aurífera de Nazca, tomando muestras de yacimientos cercanos a Otoa como los yacimientos Huanca, Coca cola y Lecheria, donde el investigador concluye que son yacimientos de tipo primario con vetas en rocas volcánicas, cuya composición es básicamente cuarzo y pirita aurífera, las muestras de cada yacimiento pasaron por una serie de pruebas de cianuración mediante pruebas en botellas con las siguientes condiciones operativas: concentración de cianuro=0.10%, pH=11.025, cal=2.10g, y un tiempo de cianuración=36hrs, alcanzándose una extracción de oro del 79.95%, 82.51% y 85.35% respectivamente para cada yacimiento, con lo cual vemos que la extracción de oro ronda un 83%, concluyendo que el resto de oro no extraído se encuentra en forma de oro refractario o pirítico.

(Vilcapoma, 2021) en su tesis titulada **“Optimización de la extracción y modelamiento de las variables operativas que afectan el circuito de lixiviación con cianuro de la planta de procesamiento de oro de Ares utilizando un modelo CCD”** Este estudio se llevó a cabo utilizando muestras de la planta de procesamiento de oro de la Compañía Minera Ares S.A., con el propósito de evaluar, modelar y optimizar las principales variables del proceso de cianuración

de oro. Mediante el uso de un diseño factorial. Las variables estudiadas fueron el pH, porcentaje de sólido, concentración de NaCN, tamaño de partícula y tiempo de lixiviación, la máxima extracción de oro obtenida fue del 90.49% bajo las siguientes condiciones operativas: pH 10, 35% de sólidos, 735.85 ppm de NaCN, tamaño de partícula de 38 μm y 24 horas de lixiviación.

2.1.3. Antecedentes locales

Barrera, (2017) en su trabajo titulado **“Evaluación de variables del proceso de cianuración de minerales refractarios piríticos en la Unidad Minera Calpa”** donde se examinó a grandes rasgos las características del mineral, la cual pertenece a la franja aurífera de Nasca, compuesto mayormente de cuarzo y pirita, encontrándose el oro en la pirita, esto fue determinado por su análisis de malla valorada, dando como resultado que el mayor porcentaje de oro se encuentra a -270 mallas; para tratar el mineral se realizó una serie de pruebas donde se consideró como variables predictoras: A:blending del mineral y B:tiempo de cianuración, mientras que su variable de respuesta es Y: % de extracción, las condiciones operativas que le dio el mejor resultado fueron 14 horas de cianuración y el primer blending con lo cual obtuvieron un 71.917% de extracción, (el blending permite regular el porcentaje de mena piritosa en el material a procesar), lo cual indica que el blending tiene una influencia significativa en el proceso de lixiviación de minerales auríferos pirítico.

(Quispe & Paliza, 2024) en su trabajo de tesis titulado **“Optimización de la extracción de oro por el proceso de cianuración en la planta de beneficio de la compañía minera Jerusalén SAC-Chala- Arequipa”** indica que la planta acopia minerales, por tal motivo el tratamiento de minerales oxidados y sulfurados es complejo debido a la diversidad y presentación de estos minerales, muchos de estos contienen oro encapsulado y diseminado, lo

que dificulta su extracción. Este estudio toma como variables la concentración de cianuro, dosificación de carbón activado y tiempo de cianuración, aplicando un diseño experimental factorial 2^3 , obteniendo una extracción óptima de oro del 91.45%, bajo las siguientes condiciones: concentración de cianuro (0.0015 Kg/L de cianuro), dosificación de carbón activado (3.5 Kg de carbón/T) y tiempo de cianuración (14 horas).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. El oro

El oro posee características químicas, físicas y mecánicas muy particulares, es un elemento químico de transición con número atómico 79, ubicado en el grupo 11 de la tabla periódica, su densidad es de 19,300 kg/m³, su punto de fusión es de 1,337.33 K (1,064 °C) y entalpía de fusión de 12.55 kJ/mol. Además, es soluble principalmente en cianuro, mercurio y agua regia y se halla en diversos tipos de rocas, incluyendo ígneas, metamórficas y sedimentarias (Morales, 2011)

2.2.1.1. Ocurrencias del oro

El oro se presenta en distintas granulometrías en la naturaleza dentro ellos podemos ver en la tabla siguiente

Tabla 1 Ocurrencias del oro

Denominación	Tamaño (um)	Método de concentración
Charpas y pepitas	>1000	Gravimetría
Oro grueso	[100-1000]	Gravimetría
Oro microscópico	[10-100]	Flotación y lixiviación
Oro submicroscópico	<10	Lixiviación

Fuente: (Contreras, 1967)

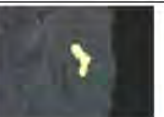
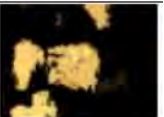
La tabla 1 nos muestra la denominación que adquiere el oro respecto a su tamaño o granulometría, así mismo nos especifica que método de concentración o extracción se suele aplicar.

Tabla 2 Mineralogía de menas auríferas

Denominación	Característica
Menas de óxido simples	Contienen partículas finas de oro nativo ya sea en cuarzo y con ganga de piedra caliza.
Menas de sulfuro simple	El oro está asociado con pequeñas cantidades de pirita y arsenopirita.
Menas complejas refractarias	Las especies minerales que contienen el oro no son solubles en el cianuro son de extracción complicada ya que requieren la destrucción de la matriz que los encapsula.

Fuente: (Porrás, 2010)

Figura 1 Ocurrencias del oro

Composite oxidado				
	Oro electrum asociado a hematita-goethita, 100X52, 38X34 μm	Oro nativo incluido en óxidos de hierro, 23X8 μm	Oro electrum incluido en cuarzo, 22X15 μm	Oro electrum asociado a hematita-goethita, 9X8 μm
Composite sulfurado				
	Oro electrum libre, 62X25, 26X15 μm	Oro electrum incluido en pirita, 54X38 μm	Oro electrum incluido en hematita-goethita, 9X8 μm	Oro incluido con pirita, 13X7, 11X10, 8X6 μm

Fuente: (Contreras, 1967)

La tabla 2 y figura 1 nos muestran y describen las ocurrencias más comunes en que se presenta el oro, siendo en nuestro caso la inclusión de oro dentro de la pirita

2.2.1.3. Causa de la refractariedad

Los minerales auríferos refractarios se definen como aquellos que no permiten conseguir valores rentables de extracción de oro mediante el método convencional de cianuración, resultando en porcentajes de extracción inferiores al 80%. Esta refractariedad, de naturaleza variada, se debe principalmente al encapsulamiento físico de partículas de oro, a menudo submicroscópicas, dentro de la matriz de sulfuros como la pirita y la arsenopirita, lo cual impide el contacto directo del cianuro con el metal precioso. Otra causa significativa son las interferencias químicas, donde minerales comunes (por ejemplo, de cobre, zinc, arsénico o antimonio) consumen cianuro o inhiben la disolución del oro de manera antieconómica. Asimismo, la presencia de constituyentes carbonosos activos puede hacer que una mena sea refractaria al retener el cianuro complejo de oro soluble por adsorción. La consecuencia de estas

características es que los relaves resultantes aún contienen elevados contenidos de oro, típicamente entre 3 y 30 g/TM, lo que exige un pretratamiento de oxidación para liberar el oro antes de la cianuración convencional. (Uceda, 2016)

El término "refractario" fue utilizado por La Brooy en 1994 en su investigación titulada *Review of Gold Extraction from Ores*. Las estadísticas mundiales indican que alrededor de dos tercios de las reservas mundiales de oro consisten en minerales que presentan dificultades de tratamiento, aproximadamente un tercio de la producción mundial de oro procede de estos minerales. (La Brooy, Linge, & Walker, 1994)

Cuando el oro está contenido en sulfuros de hierro y arsénico, especialmente pirita y arsenopirita, en tales casos, es imperativo realizar un pretratamiento de tostación oxidante para facilitar la interacción directa de la solución de cianuro con las partículas de oro. (Sanchez, Del Barrio, & Martínez, 2019)

El mineral sulfurado dificulta la interacción directa entre el oro y el reactivo de lixiviación, algunos de los métodos empleados comercialmente son la oxidación a presión, oxidación química, tostación y la biolixiviación son algunos de los métodos utilizados. (Ballester, Ballester, Verdeja, Sancho, & Martínez, 2000)

La causa principal de la refractariedad de menas auríferas, es la presencia de finas partículas submicroscópicas de oro (menores a 1 μm) que están encapsuladas en minerales de sulfuros, como la pirita (FeS_2), arsenopirita (FeAsS) y cuarzo (SiO_2). Estos minerales dificultan el contacto de la solución de cianuro con las partículas de oro. Para superar esta limitación, se requiere moler el mineral hasta obtener un tamaño de partícula promedio de 1 μm , con lo que se logra tener una mayor área de contacto del mineral con la solución cianurante. Alternativamente,

se aplican procesos de oxidación, como la tostación, la lixiviación a alta presión y temperatura, o la lixiviación bacteriana para minerales sulfurados. (SGS, 2017)

Otra posible causa de la refractariedad se debe a interferencias químicas en el proceso de extracción. Esto puede incluir la insolubilidad de minerales que contienen oro en su estructura cristalina como los telururos y auroestibnitas, así como la formación de capas de óxido y compuestos de hierro, plomo, arsénico y antimonio alrededor de las partículas de oro y plata durante ciertos procesos de extracción. Estas capas o recubrimientos inhiben la disolución del metal precios en la solución de cianuro. Además, la oxidación de minerales asociados, como la pirrotita, covelita y calcocita, en complejos cianicidas durante la disolución, también contribuye a la refractariedad. (Parga & Carrillo, 1995)

2.2.2. Muestreo

Se define como la acción de recoger muestras representativas de la calidad o condiciones medias de un todo, o la técnica empleada en esta selección para inferir el valor de características del conjunto. Su papel es crítico en todas las etapas de la industria metalúrgica, proporcionando datos esenciales para monitorear, controlar, y evaluar la eficiencia y viabilidad económica del proceso de cianuración. (Ferrer, 2019).

El muestreo desempeña un papel crítico en todas las etapas del procesamiento de minerales, ya que proporciona datos fundamentales para monitorear y controlar el proceso, así como para evaluar su eficiencia y viabilidad económica.

En primer lugar, el muestreo se utiliza para monitorear la calidad de la alimentación al proceso de cianuración. Esto implica la recolección de muestras representativas del mineral alimentado a la planta de procesamiento para evaluar su contenido de oro y otras características

relevantes. Estas muestras permiten verificar si la ley del oro en la alimentación cumple con las especificaciones deseadas y si se están tratando los minerales adecuados para maximizar la extracción de oro.

2.2.3. Molienda

La molienda de un mineral es un factor crítico en la industria metalúrgica, especialmente en procesos como la cianuración del oro. La molienda cobra una importancia particular debido a su impacto directo para la eficiencia de la disolución del oro, debido a que se tiene una relación directamente proporcional entre el área superficial de contacto del mineral con el porcentaje de extracción de oro. (Soto, 2021)

Cuando se lleva a cabo la cianuración del oro, el tamaño de partícula del mineral es un factor determinante en la velocidad y la eficiencia con que se produce la disolución del oro en la solución de cianuro. Partículas más finas tienen una mayor área superficial expuesta, lo que facilita la interacción con el agente lixivante. Por lo tanto, una molienda adecuada es esencial para lograr una mayor superficie de contacto del mineral con la solución cianurante, en consecuencia, se logra una mejor extracción de oro (Soto, 2021).

La importancia de una molienda adecuada se evidencia en su impacto directo en la extracción de oro. Una molienda inadecuada puede resultar en una baja extracción debido a la falta de exposición de las partículas de oro al agente lixivante. En otras palabras, si las partículas de oro están atrapadas en una matriz que no ha sido adecuadamente preparada durante el proceso de molienda, el cianuro no podrá acceder eficientemente al oro, lo que limitará la capacidad de disolución (Cornelio, 2017).

Además, una molienda ineficiente puede tener un impacto negativo en la rentabilidad de la operación metalúrgica. La baja extracción de oro debido a una molienda inadecuada significa que se está dejando valor en el mineral sin extraer. Esto puede traducirse en pérdidas económicas significativas para la empresa. Por lo tanto, optimizar el proceso de molienda, es fundamental para maximizar la rentabilidad de la operación (Cornelio, 2017).

2.2.3.1. Factores que afectan la molienda de los minerales auríferos

Según Cornelio, (2017), existen varios factores que influyen en la molienda de los minerales auríferos, tales como su dureza, composición mineralógica y contenido de humedad.

- **Dureza del mineral:** La dureza de un mineral se refiere a la resistencia a ser rayado o deformado. Los minerales más duros, como el cuarzo y algunos sulfuros, requieren más energía para ser molidos. Esto implica que se necesite una mayor potencia en los equipos de molienda para el incremento del área superficial del mineral. Además, la molienda de minerales duros puede generar un mayor desgaste en los equipos de molienda, lo que puede aumentar los costos operativos y de mantenimiento.
- **Composición mineralógica:** La composición mineralógica del mineral, es decir, la presencia y proporción de diferentes minerales en su matriz, puede influir significativamente en su molienda. Algunos minerales pueden ser poco competentes o difíciles de moler que otros debido a su estructura cristalina y su capacidad para formar aglomerados.

2.2.3.2. Estrategias para mejorar la molienda de minerales auríferos

Una molienda adecuada puede mejorar significativamente la eficiencia de la cianuración al exponer más áreas superficiales para la reacción química con el cianuro (Yáñez , García , Pedraza, & Laverde, 2005).

La selección de equipos de molienda adecuados es otra estrategia clave para mejorar el área de exposición de los minerales auríferos. Los molinos de bolas, los molinos autógenos y los molinos de rodillos de alta presión son algunos de los equipos utilizados en la industria minera para la molienda de minerales. La elección del equipo adecuado depende de factores como el tamaño y la dureza del mineral, así como de los requisitos de producción y consumo de energía. (Yáñez , García , Pedraza, & Laverde, 2005).

El control del contenido de humedad del mineral también es esencial para mejorar la molienda. El exceso de humedad puede provocar problemas de adherencia y aglomeración durante el proceso de molienda, lo que reduce la eficiencia del proceso y aumenta los costos operativos. (Yáñez , García , Pedraza, & Laverde, 2005).

2.2.4. Hidrometalúrgica

La hidrometalurgia consiste en la disolución selectiva de metales en soluciones acuosas, incluyendo los procesos posteriores de separación sólido-líquido, purificación de la solución, y extracción del metal final. Etimológicamente la palabra hidrometalurgia proviene de la raíz “hidro” por lo que puede decirse que es el arte y la ciencia de la extracción en un ambiente acuoso de los metales a partir de sus minerales y/o materiales que lo contienen. Por consiguiente, la extracción, extracción y purificación de metales, es a través de procesos en soluciones acuosas. (Uceda, 2016)

La hidrometalurgia se centra en la extracción de metales mediante el uso de soluciones acuosas. (Ruiz M. , 2013)

2.2.4.1. Lixiviación

Proceso químico mediante el cual los metales se disuelven en una solución acuosa, también tiene como definición “tratar una sustancia compleja, como un mineral, con un disolvente adecuado para separar sus partes solubles de las insolubles” (Uceda, 2016).

Proceso que consiste en atacar químicamente el metal precioso presente en una mena en fase acuosa. La naturaleza del reactivo químico utilizado depende de la mineralogía de la mena, condiciones ambientales y compatibilidad química. (Ruiz M. , 2013)

2.2.4.2. Generalidades de la disolución del oro

El oro, a temperaturas normales, no sufre oxidación y no se disuelve en ácidos como el clorhídrico, el nítrico o el sulfúrico. Sin embargo, puede disolverse en soluciones de cianuro de sodio, tiourea, y agua regia.

El oro también puede disolverse en soluciones que contienen bromo o cloro, pero lo hace a un ritmo más lento. Además, el oro se disuelve cuando entra en contacto con yodo. De igual manera el posee la capacidad de disolverse con soluciones de cianuro de sodio o potasio.

2.2.4.3. Cianuración del oro

La cianuración es un método que consiste en la disolución del oro en una solución diluida de cianuro de sodio o de potasio, lo que da lugar a la formación de complejos con el cianuro. El ion cianuro (CN^-) es el que tiene el efecto disolvente sobre el oro, y las bases alcalinas de sodio, potasio y calcio son las que ofrecen estabilidad al compuesto. La disolución tiene lugar en

circunstancias oxidantes, y las bases alcalinas son las que dan estabilidad al producto. (Misari, 2010)

El proceso en sí mismo es relativamente sencillo y consta de varias etapas. En primer lugar, el mineral aurífero se tritura y/o se muele hasta obtener una area superficial adecuada para la disolución del oro. Luego, se lixivia el mineral triturado con una solución de cianuro, que disuelve el oro formando complejos de cianuro de oro. Estos complejos se disuelven en la solución acuosa y se pueden recuperar posteriormente por adsorción en carbón activado o por precipitación con zinc. (Vargas, 2019)

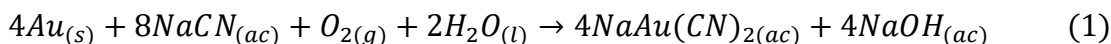
Hoy en día, la mayoría de la extracción de oro se realiza mediante el proceso de MacArthur-Forrest, comúnmente llamado cianuración. En el procesamiento de minerales de oro, se utiliza típicamente sales de cianuro, como el cianuro de sodio (NaCN), cianuro de potasio (KCN) o cianuro de calcio (Ca(CN)₂), en una solución acuosa. (Dominic, 2001)

Para que el oro se disuelva en soluciones de cianuro, es necesario que primero se oxide, aunque el oro es resistente a la oxidación, en presencia de un agente de complejización adecuado, como el ion cianuro, el oro forma un complejo cianuro de oro. Esto explica el papel del oxígeno en el proceso de cianuración del oro.

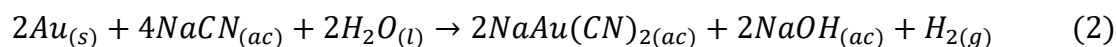
2.2.4.3.1. Ecuaciones estequiométricas de la cianuración

Existen tres ecuaciones estequiométricas que explican la formación del complejo de cianuro de oro, las cuales son las siguientes:

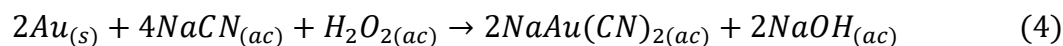
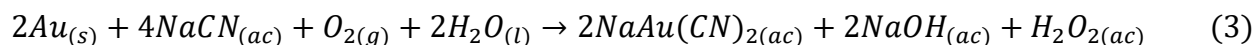
- La ecuación de Elsner también llamada teoría del oxígeno



- La ecuación de Janin también llamada teoría del hidrógeno



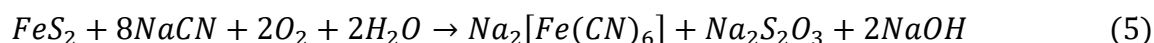
- La ecuación de Bodlaender también llamada teoría del peróxido de hidrogeno



La ecuación de Janin indica que el oxígeno necesario para el proceso se obtiene a través de la descomposición de la molécula de agua con lo cual se libera el hidrogeno, mientras que la ecuación de Bodlaender propone que se forma peróxido de hidrogeno como producto intermedio, para luego descomponerse y dar como resultado la liberación de oxígeno para dar lugar a la oxidación del oro, estas dos ecuaciones tanto de la Janin como la de Bodlaender nos muestran un complejo de cianuro de oro y sodio.

En base a cálculos de las energías libres de formación de cianuro de oro para cada ecuación, dieron como resultado que la ecuación de Elsner es la más factible, mientras que las constantes de equilibrio no son favorables tanto para la ecuación de Janin y bodlaender, en comparación a la constante de equilibrio para la ecuación de Elsner. (Misari, 2010)

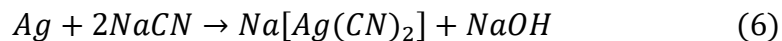
Los procesos de extracción hidrometalúrgica son complejos debido a la variedad de especies presentes en los minerales y las soluciones resultantes de los procesos, además de la reacción principal, es común que ocurran reacciones secundarias debido a la presencia de minerales sulfurados, como pirita (FeS_2) o arsenopirita ($FeAsS$), que pueden consumir tanto cianuro como oxígeno sin contribuir a la disolución del oro. Estas reacciones secundarias son problemáticas porque disminuyen la disponibilidad de reactivos para la lixiviación del oro y pueden reducir la eficiencia global del proceso. Un ejemplo de estas reacciones secundarias es la siguiente:



Esta interacción de la pirita con el ion cianuro, provoca cambios en las condiciones operativas, que ya acidifica el medio con lo cual se puede tener pérdidas de cianuro por formación de ácido cianhídrico y/o un mayor consumo de reactivos encargados de la regulación del pH. (Adams, 2016)

En este caso, el azufre de la pirita reacciona con el cianuro y el oxígeno, formando complejos de cianuro de hierro y tiosulfato, ambos no deseados en el proceso de lixiviación del oro. (Marsden & House, 2006)

Finalmente, la disolución de la plata ocurre de manera similar a la del oro, con la formación de un complejo de cianuro de plata:



2.2.4.4. Técnicas de cianuración del oro

Existe una variedad de técnicas de cianuración dentro de las cuales veremos en la tabla 3 una comparativa de ellas en base a su ley, capacidad, inversión, granulometría, tiempo de tratamiento y la extracción promedio.

Tabla 3 Comparativa de las técnicas de cianuración

Parámetro	Métodos de cianuración			
	Botaderos	Pilas	Percolación	Agitación
Tenor o ley	Muy bajo	Bajo o medio	Medio a alto	Alto
Capacidad	Grande	Flexible	Media	Flexible
Inversión	bajo	medio	Medio a alto	Alta
Tamaño de partícula	Tal y como sale de mina	Requiere trituración fina	Requiere molienda media a fina	Molienda fina
Tiempo de tratamiento	1 año o más años	1 o más meses	1 a 2 semanas	6 a 24 horas
Extracción	40 a 60 %	70 a 85 %	70 a 85 %	80 a 95 %

Fuente: (Uceda, 2016)

La tabla 3 nos da a conocer los métodos de cianuración en base a la ley del mineral, capacidad de inversión, granulometría del mineral, tiempo de tratamiento y grado de extracción, y el comportamiento en base al método de cianuración.

2.2.4.4.1. Cianuración in situ

Esta técnica de cianuración posee la característica de tratar yacimientos auríferos que poseen leyes bajas, las cuales pueden ser extraídas con costos bajos de operación. Se emplea atacando a la mena sin retirarlo de su ubicación original en donde la solución cianurante es percolada de arriba hacia abajo y llegando a puntos de colección, posteriormente esta solución cianurante es bombeada a la superficie, la disolución del oro ocurre muy lentamente debido a la poca exposición a la superficie, dificultando así el flujo de aire por ende de oxígeno. Existen dos tipos de cianuración in situ:

- La cianuración in situ gravitacional es empleada en áreas mineralizadas expuestas a la superficie o al nivel de esta, en donde previamente ha existido una explotación subterránea por ende se encuentra la mena ya fracturada de forma hidráulica o con el empleo de explosivos.
- La cianuración in situ forzada su peculiaridad es que se emplea para áreas mineralizadas enterradas, lo cual conlleva a forzar el ingreso de la solución cianurante sobre la mena utilizando pozos de inyección y posteriormente pasar a pozos de extracción. (Uceda, 2016)

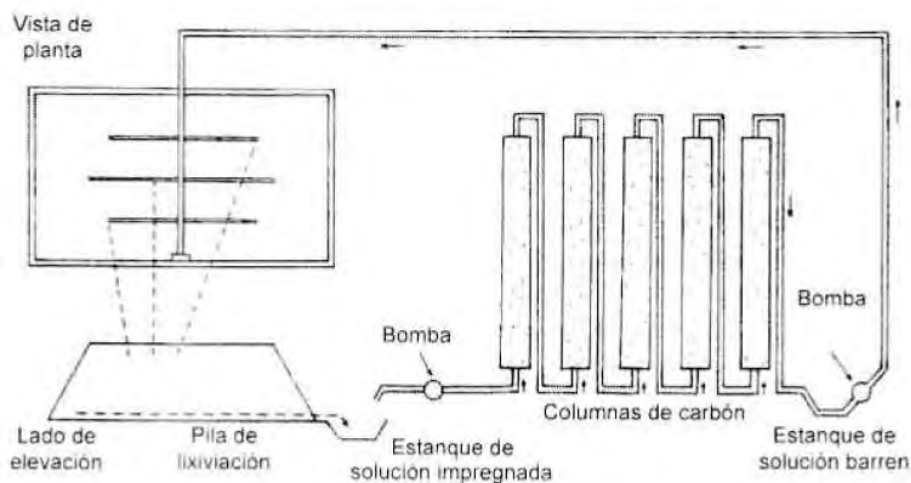
2.2.4.4.2. Cianuración en pilas

A razón del incremento del valor del oro y plata en el mercado los yacimientos que alguna vez fueron considerados no rentables, ahora están teniendo un realce en su inversión gracias a la aplicación de la cianuración en pilas para la extracción de la parte valiosa.

La cianuración en pilas se caracteriza principalmente por la forma en la que se coloca el mineral para realizar el contacto con la solución cianurante, el mineral se apila en forma vertical considerando el tamaño de partícula donde el mineral con un tamaño menor estará en la parte superior y el de mayor tamaño de partícula se encontrará en la parte inferior esto debido a las diferencias en cuanto al peso específico de partículas finas y gruesas. La pila de cianuración se encuentra sobre una superficie controlada, es decir sobre una superficie impermeable (Geomembrana) a la solución cianurante en donde es posible captar la solución enriquecida (PLS) y redireccionarla a un punto de captación para un posterior proceso de adsorción con carbón activado, cabe aclarar que una variable muy importante para lograr esta captación del PLS es el grado de inclinación de la pila de cianuración. La solución es distribuida lo más

uniformemente posible sobre todo el área superficial de la parte superior de la pila de lixiviación, con el objetivo de lograr un contacto total del mineral apilado con la solución cianurante, la cual principalmente está constituida de cianuro de sodio (NaCN) y sus derivados, de acuerdo a la mineralogía del yacimiento es posible variar este reactivo tanto en composición o porcentaje de concentración. (Uceda, 2016)

Figura 2 Diagrama de flujo típico de un circuito de cianuración en pilas



Fuente: (Uceda, 2016)

La figura 2 muestra un diagrama de flujo típico en la extracción de oro y plata dentro de la cianuración en pilas.

2.2.4.4.3. Cianuración vat leaching

El proceso de cianuración es uno de los métodos más utilizados a nivel mundial para la extracción de oro y plata de minerales mediante el uso de cianuro de sodio como agente lixivante. El término “vat leaching”, o lixiviación en tanques, hace referencia a la técnica en la cual el mineral triturado se coloca en grandes tanques, o vats, y se somete a una solución diluida

de cianuro para disolver los metales preciosos contenidos (Marsden & House, 2006). Este proceso se distingue por permitir una mayor eficiencia en la extracción de metales en comparación con otras técnicas de lixiviación en pilas o “heap leaching”.

Según Marsden y House (2006), el vat leaching es particularmente adecuado para minerales de alta ley o aquellos que requieren un control más riguroso sobre las condiciones del proceso, debido a la capacidad de ajustar parámetros como la agitación y la concentración de reactivos.

2.2.4.4.4. Cianuración por agitación

Esta técnica de cianuración resalta a comparación de las demás al ser la más utilizada. Aplicado a minerales previamente molidos, para luego ser vertidos en serie de tanques de agitación los cuales mantiene el mineral en suspensión, a su vez ayuda a homogenizar la pulpa con la solución censurante, promueve la oxigenación de la mezcla, el número de tanques depende del tiempo de lixiviación necesario. Usado en minerales de relativa alta ley para compensar los costos de molienda y agitación. (Uceda, 2016)

Figura 3 Tanque de agitación mecánica



Fuente: (Uceda, 2016)

La figura 3 nos muestra un circuito de tanques de cianuración con agitadores de tipo mecánico.

2.2.4.5. Variables de la cianuración del oro

En cuanto a las variables de cianuración y su relevancia en los procesos se tienen las siguientes:

2.2.4.5.1. Naturaleza del mineral

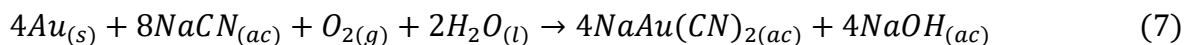
El mineral que se va a procesar ya sea mineral de cabeza o mineral pre-concentrado, es el factor más importante a tener en cuenta en cualquier método de extracción y extracción de minerales, ya que un mineral con una mayor concentración de oro, si se trata correctamente, proporcionará mejores resultados en términos de extracción y extracción.

En muchas ocasiones, se realiza una mezcla o "blendeo", a menudo llamado cabeceo, es realizado antes de procesar el mineral con el objetivo de obtener lotes lo más similares posibles en cuanto a la concentración de oro para así mantener los parámetros dentro del proceso de cianuración. (Barrera, 2017)

2.2.4.5.2. Concentración de cianuro

La concentración de cianuro es una variable fundamental y crítica en el proceso de cianuración, la razón de disolución del oro en soluciones cianuradas sigue una tendencia lineal al aumentar la concentración de cianuro hasta alcanzar un máximo, más allá de este punto un aumento adicional en la concentración de cianuro no aumenta la cantidad de oro disuelto, sino que, por el contrario, tiene un efecto ligeramente retardante. (Dominic, 2001)

Según Elsner y su ecuación:



Se establece que, estequiométricamente, se requiere un mol de oro, la mitad de un mol de oxígeno y dos moles de cianuro para que ocurra la disolución. Sin embargo, la presencia de elementos no deseados como el cobre, zinc, hierro y otros, que dificultan la extracción del oro, compiten por el consumo de cianuro, estos elementos se denominan cianicidas, lo que implica la necesidad de agregar una mayor cantidad de cianuro de la requerida según la reacción química. (Azañero, y otros, 2000)

2.2.4.5.3. Temperatura

La temperatura tiene efecto significativo en la velocidad de disolución del oro, alcanzando su punto máximo a 85°C, según los resultados obtenidos en experimentos realizados en una solución con 0.25% de cianuro, a temperaturas que oscilan entre 0° y 100°C, en dicho experimento se comprobó que existe una relación inversamente proporcional con la cantidad de oxígeno presente en la pulpa, ya que a medida que la temperatura aumenta la concentración de oxígeno disuelto disminuye. (Misari, 2010)

A pesar de que el aumento de temperatura puede acelerar la disolución del oro, el alto costo asociado a este proceso rara vez justifica su uso en minerales de baja ley. En consecuencia, en la mayoría de los casos se trabaja a temperatura ambiente. Una alternativa para trabajar a temperaturas elevadas es concentrar previamente el mineral mediante otros métodos, lo que requiere la adición de cianuro libre y la inyección de oxígeno, creando así un proceso de cianuración intensiva.

2.2.4.5.4. Agitación

El objetivo de la agitación es mantener los sólidos de la pulpa en suspensión, así también introducir aire a la solución para promover la oxidación del oro, el incremento en la agitación conduce a un aumento en la velocidad de disolución, alcanzando un punto máximo, más allá del cual la agitación tiene un efecto limitado o nulo.

Para aumentar la disolución de oro, existen dos opciones. Una de ellas es la introducción de aire mediante la agitación de la solución en el proceso, mientras que la otra implica la inyección de aire enriquecido con oxígeno, peróxido de hidrógeno u otra fuente de oxígeno.

Ambas soluciones son costosas, pero pueden justificarse en el caso de minerales con alta concentración de oro. (Azañero, y otros, 2000)

2.2.4.5.5. Granulometría

La tasa de disolución del oro está directamente relacionada con la superficie expuesta del oro, la cual está influenciada por el tamaño de las partículas minerales y el grado de liberación. En términos generales, la velocidad de disolución del oro aumenta a medida que el tamaño de las partículas disminuye, ya que esto facilita la exposición del oro a la solución de cianuro (Villacres, 1993)

Es importante tener en cuenta que mientras sea menor el tamaño de partícula se incrementa el área superficial lo cual conlleva a una cinética más rápida en el proceso de cianuración. En resumen, es esencial encontrar el tamaño de partícula óptimo.

2.2.4.5.6. pH

El pH tiene gran influencia en cuanto a la disolución del oro debido a que el ion cianuro CN^- posee dos comportamientos distintos, ya sea en un medio ácido o en un medio básico, siendo que en un medio con tendencia ácida ($pH \leq 7$) existe un incremento en la concentración de ácido cianhídrico (HCN) en el ambiente, la formación de este ácido es inversamente proporcional a la concentración de hidrogeniones (OH^-) por ende cuanto menor sea el valor del pH mayor será la concentración de ácido cianhídrico en el ambiente, lo cual conlleva a un riesgo mortal para el personal operativo, a su vez implica una pérdida de cianuro dentro del proceso de cianuración. De acuerdo con el principio termodinámico de la cianuración del oro este tendrá una

disminución en cuanto al pH de la solución cuando haya presencia de sulfuros en el mineral procesado. (Misari, 2010)

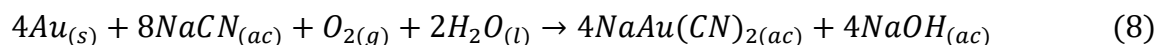
2.2.4.6. Cinética de la cianuración del oro

La cinética química es una rama fundamental de la química que se dedica al estudio de la velocidad de las reacciones químicas y los factores que influyen en ella. Esta disciplina es esencial para comprender cómo se desarrollan los procesos químicos a nivel molecular y cómo se puede controlar y optimizar la velocidad de estas reacciones.

La transferencia de iones o átomos de una red cristalina en la que se coordinan con otros iones, o átomos en una solución acuosa que se coordinan con moléculas de agua u otros agentes complejantes, es un proceso complicado y son los detalles mecanísticos de tales reacciones que todavía no está completamente resueltos. (Uceda, 2016)

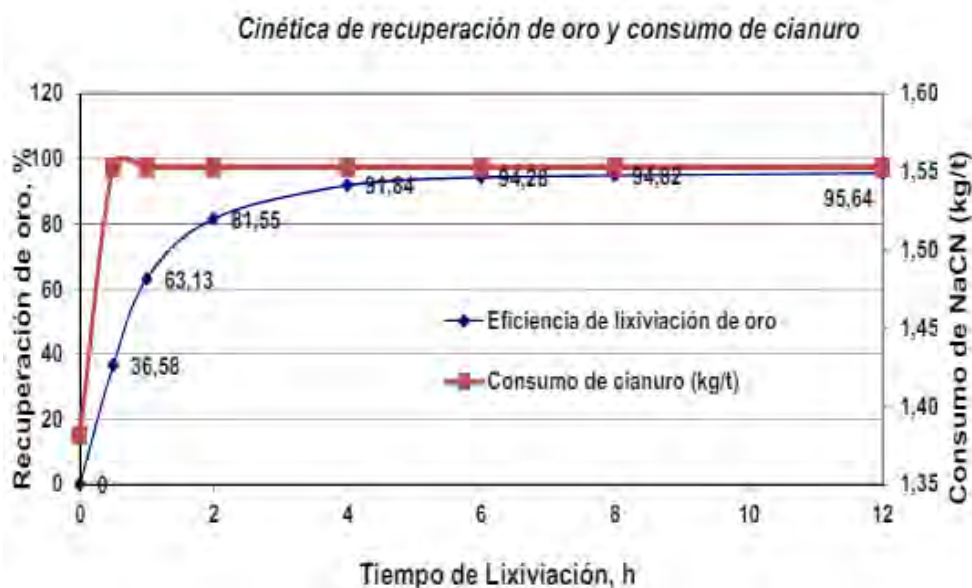
En el contexto de la cianuración del oro, la cinética química adquiere una importancia significativa, ya que se enfoca en la velocidad a la que tienen lugar las reacciones de disolución del oro en soluciones de cianuro (Frias, y otros, 2015).

Es importante reconocer que la estequiometría de una reacción no revela el mecanismo de la reacción, en el proceso de cianuración del oro tenemos la ecuación de Elsner:



Pero ello explica de forma ideal que 8 moles de cianuro de sodio forman 4 moles del complejo de cianuro de oro, pero en realidad dentro del proceso de cianuración el mineral no solo contiene oro por lo cual dicha relación no se cumple

Figura 4 Cinética de extracción de Au y consumo de cianuro



Fuente: (Frias, y otros, 2015)

La figura 4 nos muestra la relación entre el porcentaje de extracción de oro con el consumo de cianuro por tonelada de mineral.

Una comprensión detallada de la cinética química permite identificar los pasos limitantes en la reacción y diseñar estrategias para aumentar la velocidad de disolución. Esto puede implicar la modificación de parámetros como la concentración de cianuro, la temperatura, el pH y la presencia de agentes oxidantes o catalizadores (Salazar, Elorza, & Alvarado, 2016)

Además, la cinética química proporciona información sobre los mecanismos de reacción involucrados en la disolución del oro en soluciones de cianuro. Estos mecanismos pueden ser complejos y pueden implicar múltiples pasos, como la adsorción del cianuro en la superficie del oro, la formación de complejos de oro-cianuro y la transferencia de electrones. Comprender estos mecanismos a nivel molecular permite optimizar las condiciones de operación del proceso de

cianuración y prevenir posibles problemas, como la formación de precipitados indeseados o la inhibición de la reacción.

También puede ayudar a predecir la cinética de reacción en diferentes condiciones operativas y a escala de planta piloto o industrial. Esto es crucial para diseñar y operar plantas de cianuración de manera eficiente y rentable, maximizando la extracción de oro.

Se presenta una cinética relativamente lenta, esta no puede aplicarse en medios ácidos.

Con el fin de incrementar la rapidez, es indispensable la identificación de la etapa controlante; en la cual el efecto de la reacción se realiza a una menor velocidad. En esta reacción se ven involucradas la fase sólida y la fase líquida, siendo la secuencia de las siguientes etapas:

- 1) Absorción de oxígeno en la disolución.
- 2) Difusión de reactantes, esta se desarrolla en la solución hasta la interfase solido-liquido.
- 3) Adsorción de reactantes (oxígeno y cianuro) en la superficie del sólido.
- 4) Reacción electroquímica de la superficie.
- 5) Desorción en la superficie del solido de los productos de la reacción (complejos cianurados solubles de oro y otros productos de reacción)
- 6) Difusión de dichos productos en la interfase solido-liquido a la solución.

La velocidad de difusión se encarga del control del tiempo de las etapas 2 y 5, las etapas 3, 4 y 5 se manejan en función de la rapidez del proceso químico.

Se requiere de una mayor agitación en caso la difusión sea lenta, esto con el fin de acelerar la reacción, en caso la reacción sea lenta por el proceso químico es necesario incrementar la temperatura.

Para el correcto desarrollo de estas etapas es necesario tomar en cuenta las siguientes variables:

- Concentración de oxígeno, esta depende de la temperatura, altitud, fuerza iónica del medio, tipo e intensidad.
- Si la concentración de cianuro es diluida la presión de oxígeno no afectara la dilución mientras que una disolución concentrada tiene un efecto importante.
- Concentración de cianuro, esta influye cuando la disolución no se realiza a presión atmosférica.
- pH, si este es mayor a 9 se impide que la cianuración forme HCN.
- Presencia de álcalis, previene pérdida de cianuro y neutraliza compuestos ácidos del proceso.
- Presencia de otros metales, estos pueden consumir oxígeno y/o cianuro afectando la velocidad de extracción del oro.

Las altas presiones durante la cianuración generan mayor extracción de oro en menas complejas con contenido de sulfuros, telurio, selenio, arsénico, antimonio y bismuto; un bajo consumo de oxígeno conllevaría a una oxidación limitada de sulfuros y otros contaminantes. (Misari, 2010)

De acuerdo con las leyes de Fick la cianuración puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\frac{d(O_2)}{dt} = D_{O_2} \frac{A_1}{\delta} \{[O_2] - [O_2]_s\} \quad (9)$$

$$\frac{d(CN^-)}{dt} = D_{CN^-} \frac{A_2}{\delta} \{[CN^-] - [CN^-]_s\} \quad (10)$$

Donde:

$\frac{d(O_2)}{dt}$ y $\frac{d(CN^-)}{dt}$; son velocidades de difusión de O_2 y CN^- .

D_{O_2} y D_{CN^-} ; son los coeficientes de difusión expresados en cm^2/s .

A_1 y A_2 ; superficie anódica y catódica, se expresa en cm^2 .

δ ; ancho de la capa limite de Nerst, se expresa en cm.

$[O_2]$ y $[CN^-]$; la concentración de oxígeno y cianuro contenida en la solución, moles/ml.

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

Sin embargo, si se tuviese la premisa de que en la ecuación (1) y (2) la reacción química ocurre muy rápido, tendrá la siguiente igualdad $[O_2]_s = [CN^-]_s$ y de acuerdo a esto se obtendrá lo siguiente:

$$2D_{O_2} \frac{A_1}{\delta} [O_2] = \frac{1}{2} D_{CN^-} \frac{A_2}{\delta} \quad (11)$$

Y a partir de esta ecuación surge una relación muy importante, la cual señala que a una concentración alta de cianuro en la solución cianurante, la velocidad de disolución depende solamente de la concentración de oxígeno, obteniéndose la siguiente ecuación (Misari, 2010)

$$v = k_2 [O_2] \quad (12)$$

Donde:

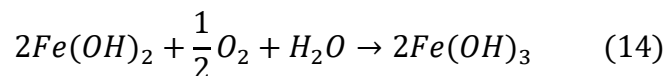
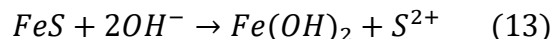
$k_2 = \text{velocidad difusición de la reacción, } cm^2/s$

$v = \text{velocidad de disolución.}$

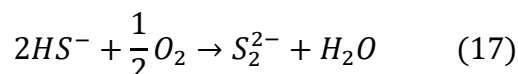
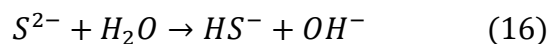
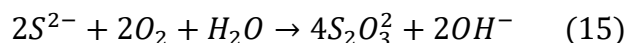
$[O_2] = \text{Concentración de oxígeno en la reaccion, Moles/ml.}$

Es imprescindible saber la cantidad de oxígeno que se encuentra disuelto durante la cianuración, debido a la variación que esta tiene respecto a la altitud y temperatura en la que se encuentre durante la realización del experimento, es necesario también tener en cuenta la reacciones del oxígeno según su concentración, con otros compuestos existentes en la mena, un

claro ejemplo es cuando la mena contiene pirrotina, la cual tiende a descomponerse de forma muy sencilla y formando hidróxidos ferrosos que luego se oxidan con el oxígeno. (Misari, 2010)



Y por su lado el ion azufre, al llegar a su estado de oxidación produce tiosulfatos y polisulfuros perjudiciales para el proceso por sus características cianicidas.



Estas reacciones muestran claramente la formación de estos compuestos a partir del consumo de oxígeno de la disolución.

2.2.4.6.1. Modelos cinéticos usados en la optimización del proceso cianuración

La modelización cinética en la cianuración del oro es fundamental para comprender y predecir la velocidad de disolución del oro. Entre los modelos cinéticos más utilizados se encuentran el modelo de velocidad de reacción superficial, el modelo de reacción en cadena y el modelo de lixiviación en múltiples etapas. (Aliaga & Palomino, 2015).

El modelo de velocidad de reacción superficial se centra en la velocidad a la que los iones de cianuro reaccionan con la superficie de la partícula oro para formar complejos de cianuro de oro. Este modelo considera la cinética de la adsorción de cianuro en la superficie del oro y la posterior reacción de disolución. Se basa en la idea de que la velocidad de disolución del oro está directamente relacionada con la velocidad a la que los iones de cianuro alcanzan la superficie del

oro y pueden reaccionar con él. Este enfoque permite comprender cómo la concentración de cianuro, la temperatura y otras variables afectan la velocidad de disolución del oro y ajustar las condiciones de operación en consecuencia (Aliaga & Palomino, 2015).

El modelo de reacción en cadena, por otro lado, considera la cianuración del oro como un proceso en el que una serie de reacciones sucesivas ocurren en cadena. En este modelo, se identifican diferentes pasos de reacción, como la adsorción de cianuro en la superficie del oro, la formación de complejos de cianuro de oro y la transferencia de masa, y se analiza cómo estas etapas interactúan entre sí para influir en la cinética global de la cianuración. Este enfoque permite una descripción más detallada y mecanicista de cómo se desarrolla la disolución del oro en el proceso de cianuración, lo que puede ser útil para identificar los pasos limitantes y diseñar estrategias de optimización más precisas (Aliaga & Palomino, 2015).

Por último, el modelo de lixiviación en múltiples etapas considera que la cianuración del oro no es un proceso homogéneo, sino que ocurre en diferentes etapas o fases, cada una con su propia cinética de reacción. Este modelo reconoce que la disolución del oro puede ocurrir en diferentes lugares dentro del mineral, como la superficie de las partículas de oro, los poros del mineral o las fisuras en la estructura del mineral. Por lo tanto, se pueden identificar diferentes etapas de lixiviación con sus propias velocidades de reacción y se pueden desarrollar modelos matemáticos para describir cómo estas etapas contribuyen a la disolución global del oro. Este enfoque permite una comprensión más completa y detallada de cómo ocurre la cianuración del oro en el contexto de la estructura y composición del mineral.

2.2.4.7. Termodinámica de la cianuración del oro

La aplicación de principios termodinámicos en la cianuración del oro es esencial para comprender la viabilidad y la dirección de las reacciones químicas involucradas en este proceso. La termodinámica ofrece un marco conceptual para analizar cómo cambian la energía y la entropía durante una reacción química, lo que a su vez permite predecir si una reacción ocurrirá de manera espontánea y en qué dirección.

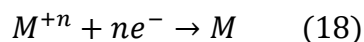
Uno de los conceptos clave en termodinámica es la energía libre de Gibbs (ΔG), que combina la entalpía (ΔH) y la entropía (ΔS) de un sistema. La energía libre de Gibbs determina si una reacción es espontánea o no a una temperatura y presión dadas. Si ΔG es negativo, la reacción es espontánea y tiende a avanzar en la dirección de la formación de productos. Por otro lado, si ΔG es positivo, la reacción no es espontánea en esas condiciones y requiere una entrada de energía externa para ocurrir. En el contexto de la cianuración del oro, el análisis de ΔG permite evaluar si la disolución del oro en una solución de cianuro es energéticamente favorable o no (Caicedo, 2009).

En el proceso de cianuración del oro, es necesario superar una barrera energética para disolver el oro y formar complejos de cianuro de oro. Esta barrera energética está determinada por la energía requerida para romper los enlaces entre el oro y los otros elementos presentes en el mineral y la energía necesaria para formar los complejos de cianuro de oro. La termodinámica proporciona herramientas para predecir esta energía requerida y, por lo tanto, la viabilidad de la reacción de cianuración. Además, el conocimiento de la energía libre de Gibbs también ayuda a determinar la dirección en la que se llevará a cabo la reacción, es decir, si la disolución del oro ocurrirá de manera espontánea en presencia de una solución de cianuro (Pérez, 2019).

Otra herramienta termodinámica importante en la cianuración del oro es la constante de equilibrio (K), que describe la relación entre las concentraciones de los reactivos y los productos en el equilibrio de una reacción química. En el caso específico de la cianuración del oro, la constante de equilibrio se utiliza para determinar la extensión de la disolución del oro en soluciones de cianuro. Un valor alto de K indica que la reacción está favorecida hacia la formación de productos, lo que significa que una mayor proporción de oro se disolverá en la solución de cianuro. Por el contrario, un valor bajo de K indica que la reacción está favorecida hacia los reactivos, lo que significa que la disolución del oro en la solución de cianuro será limitada (Botero, 2021)

Para tener un mejor entendimiento de las reacciones químicas y mecanismos de reacción química relacionados a la cianuración del oro es vital tener presente los principios termodinámicos basados en sus estados estables y metaestables, los cuales son fácilmente representados en los diagramas de Pourbaix, el cual relaciona el potencial electrónico (EH) y a su vez está relacionado al pH del medio acuoso. Según los diagramas de Pourbaix es necesario saber que los diagramas de las moléculas de $[Au(OH)]_3$, $[AuO]_2$, $[Au(OH)]_3^{2-}$, en caso de estos compuestos es indispensable la aplicación de elevados valores en cuanto a los potenciales redox, necesarios para su descomposición y posterior lixiviación del oro. (Misari, 2010)

En la lixiviación del oro es vital que se tenga al oro en su estado oxidado y su fase soluble así mismo se debe buscar su estabilidad en el sistema químico donde ocurre la reacción. En gran parte de las reacciones ocurridas con un metal (M) que entra en contacto con sus iones M^{+n} , se obtiene una reacción con la siguiente estructura: (Viraca, 2010)



Y a partir de esta, el potencial de reducción está relacionado a las concentraciones gracias a la ecuación de Nerst.

$$E = E^{\circ} - \frac{RT}{nF} \ln \frac{[M]}{[M]^{+n}} \quad (19)$$

Donde:

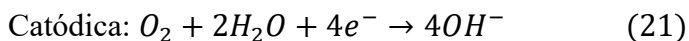
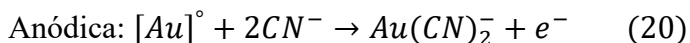
R: Constante de los gases = 8,134 joules/(°K.mol)

T: Temperatura absoluta.

E° : Potencial estándar de reducción en la escala H.

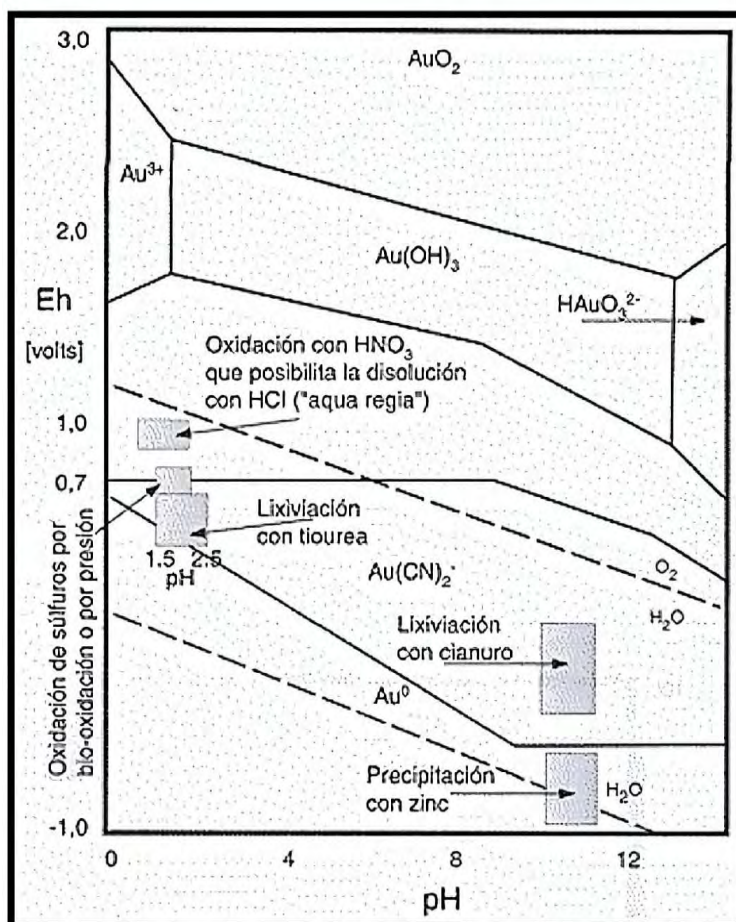
F: constante de Faraday.

Bajo este principio explicado por la ecuación de Nernst se puede afirmar que la cianuración del oro tiene naturaleza electroquímica por ende puede explicada bajo las siguientes reacciones:



De acuerdo con todo lo expuesto anteriormente en cuanto a la termodinámica de la cianuración de oro se concluye la factibilidad de su cianuración, los cuales pueden ser interpretados fácilmente en los siguientes diagramas de pourbaix (Fig 5), relacionando el potencial eléctrico (Eh) y el pH.

Figura 5 Diagrama Eh – pH sistema Au – SCN – H₂O a condiciones normales



Fuente: (Uceda, 2016)

Es de fácil interpretación que la factibilidad de la cianuración aumenta a partir de un $pH = 9.21$, y de concentraciones de $Au = 10^{-4}$ molar y $CN^{-} = 10^{-1}$.

2.2.4.7.1. Formación de complejos de cianuro y su estabilidad termodinámica

Los complejos de cianuro de oro, como $[Au(CN)_2]^{-}$ y $[Au(CN)_4]^{2-}$, desempeñan un papel fundamental en el proceso de cianuración del oro al ser los principales productos de la disolución del oro en soluciones de cianuro. Estos complejos se forman cuando el oro se disuelve

en presencia de cianuro y oxígeno, y su estabilidad está influenciada por una serie de factores que afectan la cinética y el equilibrio de la reacción de cianuración.

La concentración de cianuro es uno de los factores más importantes que afectan la formación y estabilidad de los complejos de cianuro de oro. A concentraciones bajas de cianuro, la formación de complejos puede ser limitada, lo que reduce la cantidad de oro que se puede disolver en la solución. Por otro lado, a concentraciones más altas de cianuro, se favorece la formación de complejos de cianuro de oro, lo que aumenta la eficiencia del proceso de cianuración al permitir una mayor disolución y extracción de oro. Sin embargo, es importante tener en cuenta que niveles excesivamente altos de cianuro pueden ser perjudiciales para el medio ambiente y la salud humana, por lo que se deben encontrar niveles óptimos que maximicen la eficiencia del proceso sin comprometer la seguridad (Mendoza & Pedraza, 2005).

El pH también juega un papel crucial en la formación de complejos de cianuro de oro. La mayoría de las reacciones de cianuración del oro ocurren en un rango de pH ligeramente básico a neutro, ya que el cianuro es más efectivo para disolver el oro en este rango de pH. Además, el pH puede afectar la estabilidad de los complejos de cianuro de oro, con pH más bajos que pueden provocar la precipitación de algunos complejos y pH más altos que pueden disminuir la velocidad de formación de los complejos (Ferrer, 2019). Por lo tanto, mantener un pH controlado y óptimo es crucial para garantizar una alta eficiencia en el proceso de cianuración.

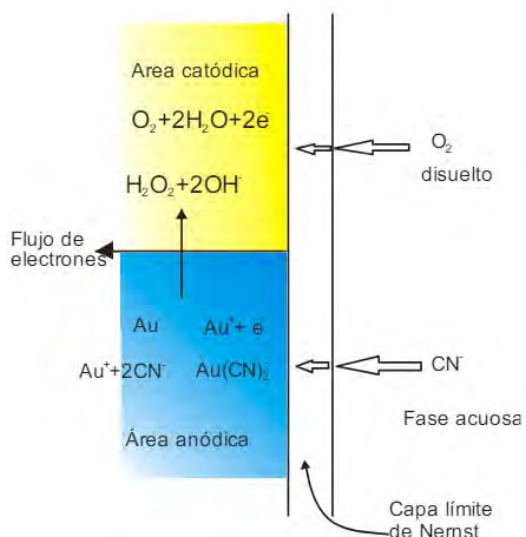
La presencia de impurezas también puede influir en la formación y estabilidad de los complejos de cianuro de oro. Algunas impurezas presentes en el mineral pueden competir con el oro por la formación de complejos de cianuro, lo que reduce la eficiencia del proceso al disminuir la cantidad de oro disponible para la disolución. Además, ciertas impurezas pueden interactuar con los complejos de cianuro de oro, afectando su estabilidad y capacidad para

disolver el oro (Botero, 2021). Por lo tanto, es importante realizar un análisis detallado de las impurezas presentes en el mineral y tomar medidas para mitigar su impacto en el proceso de cianuración.

La temperatura también ejerce una influencia significativa en la cinética de la cianuración del oro al afectar la energía de activación y la constante de velocidad de las reacciones químicas. A temperaturas más altas, se proporciona más energía a las moléculas, lo que aumenta la frecuencia de colisiones efectivas y, por lo tanto, la velocidad de las reacciones. Además, la temperatura puede afectar la estabilidad de los complejos de cianuro de oro, lo que a su vez influye en la eficiencia del proceso de cianuración. Sin embargo, es importante tener en cuenta que temperaturas extremadamente altas pueden resultar en la descomposición del cianuro y la formación de compuestos tóxicos.

La presencia de impurezas, como el cobre, puede afectar tanto la cinética como la termodinámica de la cianuración del oro. Estas impurezas pueden competir con el oro por la formación de complejos de cianuro, lo que reduce la cantidad de oro disponible para la disolución. Además, ciertas impurezas pueden interactuar con los complejos de cianuro de oro, afectando su estabilidad y su capacidad para disolver el oro. Por lo tanto, es crucial realizar un análisis detallado de las impurezas presentes en el mineral y tomar medidas para mitigar su impacto en el proceso de cianuración.

Figura 6 Representación esquemática de la disolución de oro



Fuente: (Ferrer, 2019)

2.4.2.7.2. Aplicaciones prácticas en la optimización de la cianuración del oro

La aplicación de principios termodinámicos en la optimización del proceso de cianuración del oro es fundamental para garantizar una operación eficiente y selectiva. Los conceptos termodinámicos proporcionan un marco teórico sólido para entender cómo cambian la energía y la entropía durante las reacciones químicas, lo que permite identificar las condiciones operativas óptimas para maximizar la eficiencia y la selectividad del proceso.

La selección de condiciones operativas, como la concentración de cianuro y el pH, se basa en consideraciones termodinámicas para garantizar que la disolución del oro en la solución de cianuro sea energéticamente favorable y ocurra de manera selectiva. Por ejemplo, la termodinámica puede ayudar a determinar la concentración óptima de cianuro que maximiza la formación de complejos de cianuro de oro y, por lo tanto, la disolución del oro en la solución. Del mismo modo, el pH adecuado garantiza la estabilidad de los complejos de cianuro de oro y

la selectividad de la disolución del oro sobre otros minerales presentes en la mena. Al comprender los principios termodinámicos subyacentes, los operadores mineros pueden ajustar estas condiciones operativas para optimizar la eficiencia y la selectividad del proceso de cianuración.

Además, la termodinámica también es útil en la predicción de la extracción de oro y la minimización de la formación de productos secundarios no deseados. Mediante el análisis de la energía libre de Gibbs y la constante de equilibrio, es posible estimar la cantidad de oro que se disolverá en la solución de cianuro bajo ciertas condiciones operativas. Esto permite a los operadores mineros prever la eficacia del proceso y tomar medidas para mejorar la extracción de oro, como ajustar la concentración de cianuro o el pH. Además, la termodinámica puede ayudar a identificar condiciones que favorezcan la formación de productos secundarios no deseados, como la precipitación de otros minerales junto con el oro. Al comprender cómo los cambios en las condiciones operativas afectan la energética de las reacciones, los operadores pueden minimizar la formación de estos productos secundarios y maximizar la extracción de oro. (Habashi, 1999)

2.2.4.8. Minerales refractarios en la cianuración

Los minerales de oro son catalogados como "refractarios" cuando una parte significativa de estos metales no puede ser extraída de manera eficiente mediante métodos convencionales, o cuando la extracción mediante el proceso de cianuración convencional es baja, es decir, inferior al 80%. También se consideran refractarios cuando los desechos resultantes contienen una cantidad notable de oro, generalmente en el rango de 3 a 30 gramos por tonelada métrica.

Los depósitos de minerales refractarios se dividen geoquímicamente en dos categorías: minerales sedimentarios, que contienen oro libre en su composición, y minerales hidrotermales, donde el oro se encuentra asociado con sulfuros carbonosos y compuestos de sílice. Ambos tipos de depósitos se consideran difíciles de recuperar debido a la naturaleza refractaria de los minerales involucrados. (Uceda, 2016)

CAPITULO III

HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. General

La extracción de oro se optimiza a partir de menas auríferas por medio de la evaluación de variables del proceso de cianuración por agitación en la planta de beneficio de la Unidad Minera Aidita.

3.1.2. Específicas

- La concentración óptima de cianuro de sodio permite una adecuada extracción de oro a partir de menas auríferas por medio del proceso de cianuración por agitación en la planta de beneficio de la Unidad Minera Aidita.
- El tiempo de cianuración óptima permite maximizar la extracción de oro a partir de menas auríferas por medio del proceso de cianuración por agitación en la planta de beneficio de la Unidad Minera Aidita.

3.2. Variables

3.2.1. Variable dependiente

- Extracción de oro

3.2.2. Variables independientes

- Concentración de cianuro de sodio (ppm)
- Tiempo de cianuración (días)

3.3. Operacionalización de variables

Tabla 4 Matriz de operacionalización de variables

Variable		Definición teórica	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Unidades	Instrumento
Dependiente	Extracción de oro	Es la cantidad de oro disuelto en la lixiviación, expresado en porcentaje	Es el total de oro extraído a partir de su mineral	Porcentaje de extracción	Porcentaje	%	Balance de materia
	Tiempo de cianuración	Es el tiempo en el cual la pulpa entra en contacto con la solución lixivante	Tiempo en el cual se mantiene en agitación la pulpa junto a la solución lixivante en una celda	Tiempo de residencia	días	días	Cronometro
Independiente	Concentración de cianuro	Cantidad de cianuro de sodio presente en una solución	Se usa como soluto en una solución para una extracción de minerales metálicos	Fuerza de cianuro	Partes por millón	ppm	(Titulación química)

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

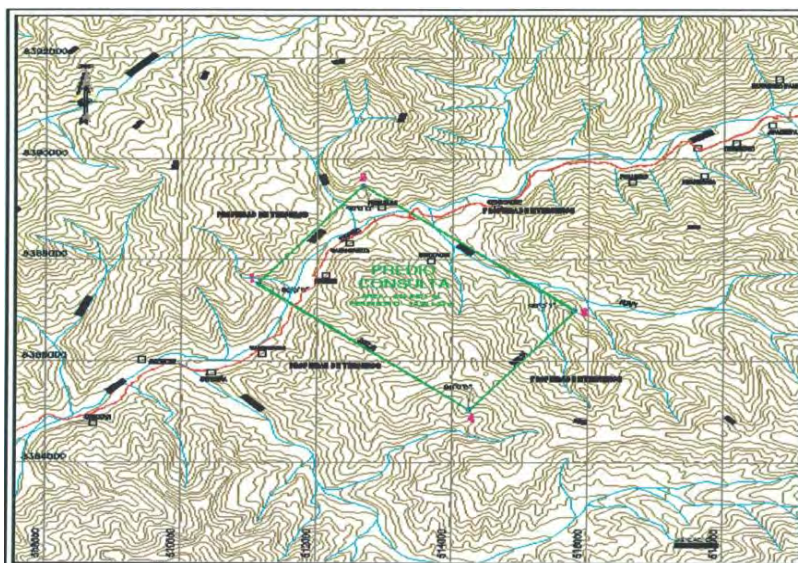
4.1. Ámbito del estudio

El presente trabajo de investigación se realizó en las instalaciones de la planta de beneficio de la Unidad Minera Aidita y laboratorios de la facultad de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

4.1.1. Localización

La Unidad Minera Aidita se ubica entre los departamentos de Ica y Ayacucho, provincias de Nasca y Lucanas, distritos de El Ingenio y Concepción, parajes Huarasaca y Carahuarco, tiene una extensión de 1000 hectáreas. Es accesible por la carretera panamericana sur: Lima-repartición El Ingenio (Nasca): 416 km y repartición El Ingenio-Huarasaca: 30 km de carretera afirmada, la figura 8 muestra el plano en relieve de la Unidad Minera Aidita.

Figura 7 Ubicación geográfica - planta de la Unidad Minera Aidita



(Jara, 2005)

Para tener una ubicación mucho más precisa del predio Aidita tenemos las siguientes coordenadas son presentadas en la tabla 5.

Tabla 5 Demarcaciones de la unidad minera Aidita

Vértice	Coordenadas UTM		Coordenadas WGS	
	Norte	Este	Norte	Este
1	8,389,843.60	512,907.82	8,389,473.59	512,684.91
2	8,387,356.61	516,037.58	8,386,986.58	515,814.28
3	8,385,400.72	514,482.88	8,385,030.66	514,259.97
4	8,387,887.71	511,353.45	8,387,517.68	511,130.58

Fuente: (INGEMET, 2015)

4.1.1. Geología de la concesión

El área de la concesión aflora rocas intrusivas del Batolito de la costa del cretáceo superior-terciario inferior representadas por granodioritas, gabros, pórfido cuarcífero y andesitas basálticas que instruyen a rocas sedimentarias del grupo yura del cretáceo inferior formadas por estratos de lutitas y cuarcitas. (Jara, 2005)

4.2. Diseño de la investigación

Se clasifica como "experimental puro" debido a que cumple con los requisitos fundamentales de control y validez interna, que incluyen la presencia de grupos de comparación y la equivalencia inicial de estos grupos. Su naturaleza experimental implica la manipulación intencional de una o más variables independientes (consideradas causas) para observar y analizar sus consecuencias sobre una o más variables dependientes (supuestos efectos), para ello se

utilizó un diseño experimental de tipo factorial, ya que se buscó establecer el efecto de la manipulación de las variables, las cuales son la concentración de cianuro de sodio, tiempo de lixiviación.

4.2.1. Método experimental

El presente trabajo para alcanzar el objetivo se basa en realizar un diseño de pruebas metalúrgicas en condiciones prefijadas y sometidas a control, modificando y combinando sus variables, con el fin de obtener el resultado esperado y su consiguiente la validación en el diseño experimental. La investigación presente es de tipo cuantitativa con carácter experimental-aplicativo diseñado para transformar conocimientos teóricos en soluciones prácticas, con el objetivo de mejorar y optimizar procesos industriales. Este tipo de investigación se caracteriza por ser secuencial y probatoria, donde se manipulan intencionalmente una o más variables independientes (supuestas causas) para analizar sus consecuencias sobre variables dependientes (supuestos efectos). Se lleva a cabo en condiciones controladas, a menudo a nivel de laboratorio, replicando fenómenos concretos para observar el grado en que las variables manipuladas producen un efecto determinado. La recolección de datos se basa en la medición numérica y el análisis estadístico, buscando establecer patrones de comportamiento y probar hipótesis formuladas previamente. Un fin primordial es la generalización de los resultados a una población más amplia, lo que la diferencia de otros enfoques.

4.2.2. Tipo de investigación

Esta investigación es de tipo descriptivo, porque se realiza la descripción del problema en una circunstancia espacial determinada, además será la mas adecuada para la problemática de la

investigación por su origen y su desarrollo; es correlativo porque tiene como finalidad determinar el grado de relación causal existente entre dos o más variables evaluando la hipótesis sujeta a comprobación.

4.2.3. Nivel de investigación

Es explicativo, porque intenta informar de un aspecto de la realidad explicando su significancia dentro de una teoría referencial encargada de buscar por qué de los hechos mediante el establecimiento de las relaciones causa-efecto.

4.2.1. Enfoque de la investigación

Es cuantitativo y experimental, porque consiste en recolectar y analizar datos numéricos este método es ideal para identificar tendencias, promedios, variaciones, realizar predicciones, comprobar relaciones y obtener resultados generales.

4.3. Población de estudio

La población está constituida por los minerales piríticos del yacimiento de la Unidad Minera Aidita.

4.3.1. Tamaño de muestra

Para la realización de las pruebas de caracterización y los ensayos de lixiviación por cianuración, se utilizó una muestra total de **50 kilogramos de mineral aurífero** proveniente del yacimiento de la **Unidad Minera Aidita**. Este tamaño de muestra fue determinado en función de criterios técnicos y experimentales, considerando la necesidad de asegurar la representatividad del mineral, la ejecución de los ensayos metalúrgicos y la repetibilidad de los resultados.

La cantidad seleccionada permitió disponer de material suficiente para la preparación de muestras, la realización de pruebas de caracterización, ensayos de molienda y pruebas de cianuración correspondientes al diseño experimental, así como para compensar las pérdidas inherentes a las etapas de chancado, cuarteo y molienda. Asimismo, el tamaño de muestra se encuentra dentro del rango recomendado para estudios metalúrgicos a nivel de laboratorio, garantizando la confiabilidad de los resultados obtenidos.

El muestreo se realizó mediante la técnica de **muestreo aleatorio**, con el objetivo de minimizar sesgos y asegurar que la muestra sea representativa del mineral procesado en la planta de beneficio.

4.3.2. Técnicas e instrumentos de toma de datos

- Pruebas experimentales en laboratorio
- Observación directa
- Medición
- Análisis químico

4.3.2.1. Técnica (técnica de recolección de datos)

- Revisión bibliográfica
- Pruebas metalúrgicas experimentales
- Pruebas de la molienda
- Reporte de análisis químico

4.3.2.2. Instrumentos, equipos y materiales

- Lista de cotejo
- Computador personal
- Informe de pruebas experimentales
- Balanzas analíticas
- Juego de tamices
- pH metro
- Software Minitab 20

4.5. Análisis de datos

Los softwares a utilizar serán Microsoft Excel y Minitab 21, aplicando estadística tanto descriptiva como inferencial

4.6. Alcances y limitaciones

Se contó con los medios y recursos necesarios, básicos, para desarrollar las pruebas experimentales de extracción de oro mediante lixiviación por agitación.

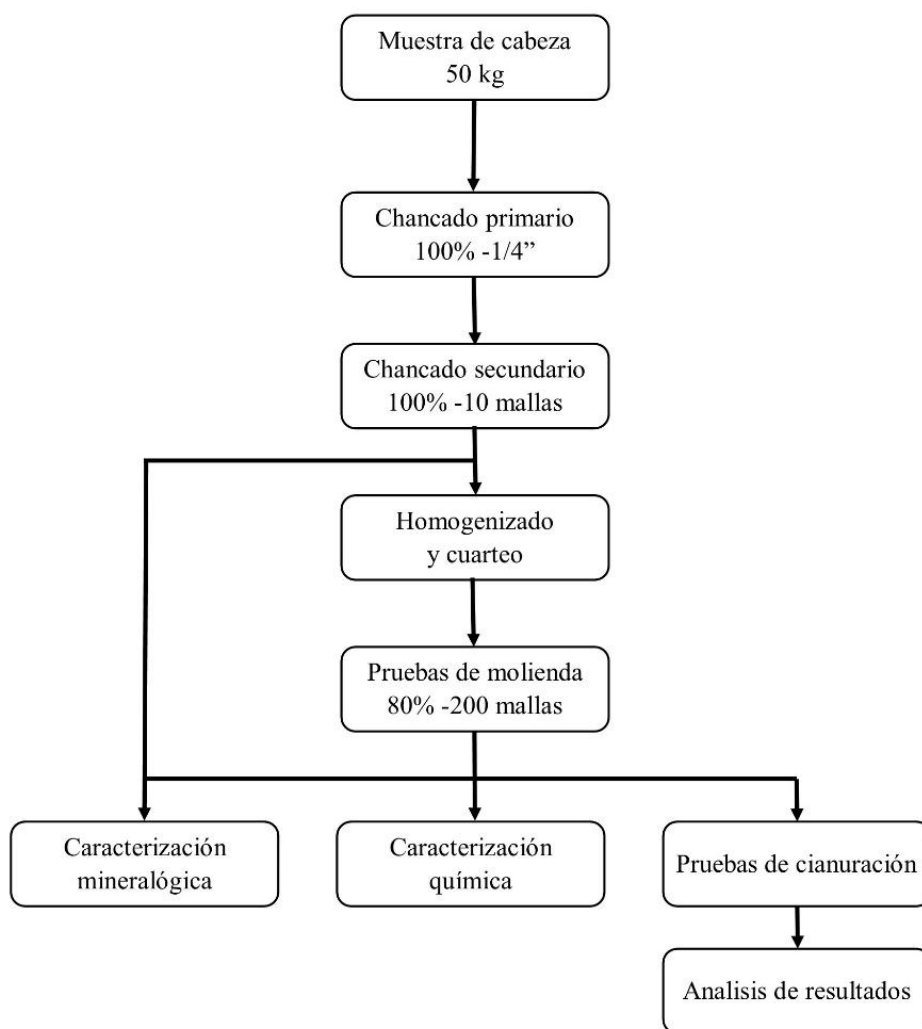
Por otra parte, como limitación tenemos que al ser una planta de beneficio de pequeña capacidad muchos de los materiales y equipos de los que se dispone no son estandarizados ni validados por una entidad acreditadora, muchos de los equipos a utilizados fueron fabricados de forma artesanal, para evitar este tipo de problemas se enviaron las muestras a un laboratorio externo.

CAPITULO V

PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El proceso de cianuración comprende diferentes etapas.

Figura 8 Diagrama de flujo del desarrollo experimental

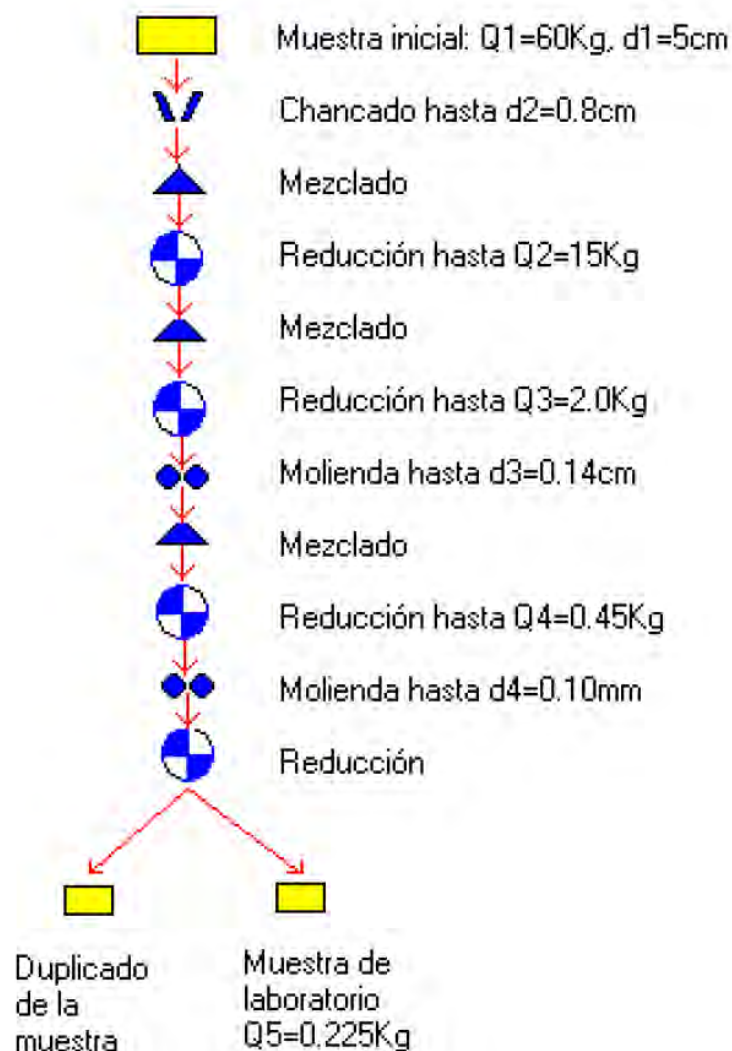


La figura 9 la cual muestra el diagrama de flujo del procedimiento experimental que se ejecutó.

5.1. Muestreo

Para el muestreo se aplicó el siguiente protocolo.

Figura 9 Protocolo de muestreo para mineral de oro



La figura 10 nos muestra el protocolo de muestreo de minerales y la secuencia de operaciones para la preparación de muestra.

5.2. Preparación mecánica del mineral

Los 50 kg de mineral de muestra fue reducido de tamaño a 100% -10 mallas, esto por medio de los equipos del laboratorio de preparación mecánica (HPGR, chancadora cónica), posteriormente se realizaron las pruebas de molienda.

5.3. Análisis químico del mineral

Para realizar cualquier prueba necesitamos conocer el tenor o ley de cabeza de nuestro mineral, para lo cual el mineral producto de molienda fue enviado al laboratorio Minares South S.R.L. en donde se aplicó el método de ensayo al fuego (fire assay).

Tabla 6 Resultados del análisis de ley de oro en la alimentación (cabeza)

Ley de cabeza	
Oz-Au/TC	g-Au/TM
0.505	17.28

Fuente: Laboratorio Minares South

Como nos muestra la tabla 6 tenemos un mineral con una ley de 17.28 gramos oro por tonelada métrica de mineral.

5.4. Caracterización mineralógica

Esta parte del estudio se realizó con apoyo del Ingeniero Geólogo Elías Macrobio Espinoza Cárdenas quien determinó visualmente la composición mineralógica del mineral.

Para lo cual se tomó una parte de la muestra para realizar una concentración gravimétrica manual, con la finalidad de ver la presencia de oro libre, tal como se muestra en la figura 11.

Figura 10 Muestra concentrada (concentración gravimétrica)



En la figura 11 se aprecia los resultados de la operación de concentración gravimétrica que paso la muestra para el respectivo análisis visual, con lo que se ve claramente la presencia de oro libre, sin embargo, se ve una gran cantidad de pirita y otros materiales que acompaña a la muestra, los porcentajes se describen en la tabla 7.

Tabla 7 Composición mineralógica del material puruñado

Nombre	Formula	Porcentaje
Roca intrusiva	-----	60.0
Pirita	FeS ₂	38.0
Cuarzo lechoso	SiO ₂	20.0
Cuarzo hialino	SiO ₂	10.0
Oro	Au	2.0
Plata	Ag	1.0

Nota: descrito macroscópicamente por el Ing. Elias Espinoza.

Tabla 8 Composición mineralógica de la veta superior del yacimiento

Nombre	Formula	Porcentaje
Cuarzo lechoso	SiO ₂	48.0
Cuarzo hialino	SiO ₂	18.0
Roca intrusiva	-----	8.0
Pirita masiva y diseminada	FeS ₂	10.0
Hematita	Fe ₂ O ₃	7.0
Magnetita	Fe ₃ O ₄	3.0
Bornita	Cu ₅ FeS ₄	2.0
Calcopirita	CuFeS ₂	1.0
Goethita	FeO ₂ H	1.0
Jarosita	KFe ₃ (OH) ₆ (SO ₄) ₂	1.0
Otros	-----	1.0

Nota: descrito macroscópicamente por el Ing. Elias Espinoza.

La tabla 8 nos muestra el porcentaje de cada compuesto del mineral, en el cual tenemos cuarzo lechoso con presencia de matriz de pirita granular y microgranular, magnetita cristalizada en fracturas, así mismo se corrobora la presencia de goetita, hematita y jarosita, como roca caja de ambos lados se presenta el gabro y esta a su vez en medio de las dioritas y andesitas

Tabla 9 Composición mineralógica de la veta inferior

Nombre	Formula	Porcentaje
Cuarzo lechoso	SiO ₂	48.0
Roca intrusiva	-----	10.0
Pirita masiva y diseminada	FeS ₂	20.0
Cuarzo hialino	SiO ₂	7.0
Calcopirita	CuFeS ₂	5.0
Magnetita	Fe ₃ O ₄	4.0
Bornita	Cu ₅ FeS ₄	2.0
Crisocola	(Cu,Al) ₄ H ₄ (OH) ₈ Si ₄ O ₁₀ ·nH ₂ O)	2.0
Jarosita	KFe ₃ (OH) ₆ (SO ₄) ₂	1.0
Otros	-----	1.0

Nota: descrito macroscópicamente por el Ing. Elias Espinoza.

La tabla 9 nos muestra el porcentaje de cada compuesto del mineral, la anomalía principal es la pirita granular sin presencia de oro mientras que la pirita microgranular presenta oro, hematita anomalía fundamental para la presencia de oro, el cuarzo lechoso presenta oro en sector con porosidad microgranular.

5.5. Molienda

Para las pruebas de molienda se realizaron un total de 5 pruebas con una diferencia de tiempo de 5 minutos entre ellas siendo los tiempos (5, 10, 15, 20, y 30 minutos), el mineral usado para las pruebas fue previamente preparado a una granulometría de 100% -10 mallas homogenizado y muestreado.

Cada una de las pruebas de molienda fueron realizadas en el molino de bolas estándar que tenemos en el laboratorio de preparación mecánica de la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica.

Tabla 10 Condiciones operativas del molino estándar

Características de diseño	Longitud (in)	13
	Diámetro (in)	8
	Volumen (L)	10.7
Apartado operativo	Velocidad operativa (RPM)	20.3
	Carga de mineral (kg)	1

la tabla 10 nos muestra las características y condiciones a las que operara el molino

Tabla 11 Condiciones operativas de la prueba de molienda

Nº prueba	Tiempo (min)	Peso del mineral (kg)
------------------	---------------------	------------------------------

1	0	
2	5	
3	10	
4	15	1
5	20	
6	25	
7	30	

La tabla 11 nos muestra las condiciones operativas de las pruebas de molienda.

El mineral molino respecto a cada tiempo, se homogenizo y muestreo un total de 100 g con el objetivo de facilitar el cálculo del porcentaje de mineral pasante y retenido; el mineral se lavó en la malla de control (malla 200).

5.6. Determinación de gravedad específica

El método aplicado fue el de la fiola, para ello se toma 5 g de muestra de mineral para luego tomar el peso de la fiola con agua, posteriormente se procede a verter el mineral en la fiola vacía, para luego aforar de agua la fiola y esta se pesa.

$$GE = \frac{W_m}{W_m + W_{f+a} - W_{f+m+a}} \quad (22)$$

Donde:

GE = Gravedad específica

W_m = Peso de mineral

W_{f+a} = Peso de la fiola + agua

W_{f+m+a} = Peso de la fiola + mineral + agua

Tabla 12 Toma de datos para el cálculo de la gravedad específica

Prueba	W_m (g)	W_{f+a} (g)	W_{f+m+a} (g)
1	5	146.94	150.00
2	5	147.00	150.04
3	5	146.99	150.02

La tabla 12 nos muestra los datos de los pesos.

5.7. Prueba de cianuración

El motivo de la prueba de cianuración es para conocer el consumo de cianuro de sodio y NaOH en el mineral de prueba (describir detalladamente)

Tabla 13 Condiciones de la prueba de cianuración preliminar

Peso de mineral seco	2	kg
Ley de mineral	17.28	g/TM
Granulometría	80.3	%-200 mallas
Gravedad específica	2.56	g/mL
Volumen de agua	4	L
pH	12	
Concentración de NaCN	2	g/L (ppm)
Tiempo de cianuración	48	hrs
Vol. muestra a titular	5	mL

A partir de los valores de la tabla 13 presenta los datos parámetros operativos de la prueba.

Tabla 14 Control de prueba metalúrgica preliminar de cianuración

N° de toma	Tiempo (hrs)	Control de parámetros			Adición de reactivos		
		pH		AgNO ₃ (mL)	CN- libre	NaCN ⁻ (g)	NaOH (g)
		Inicial	Final				
1	0	7	12	0.0	0.000	8.00	3
2	4	12	12	0.2	0.160	0.80	
3	8	12	12	2.4	0.192	0.40	
4	8	12	12	2.2	0.176		
5	4	12	12	1.9	0.152	0.96	
6	4	12	12	2.5	0.200		
7	8	12	12	2.9	0.232		
8	12	12	12	2.4	0.192		
Total	48					10.16	3

La tabla 14 nos muestra el los datos colectados provenientes de la prueba de cianuración, la cual contiene los consumos de cianuro de sodio y soda caustica.

5.8. Desarrollo experimental de las pruebas de cianuración en baldes de agitación

En base a la matriz de diseño experimental se procede a realizar las pruebas, como se muestra en la tabla 15.

Tabla 15 Matriz de diseño factorial 2^2 con un punto central

N° de pruebas	Escala codificada		Escala natural	
	X1	X2	A	B
1	-1	-1	1	1
2	1	-1	3	1
3	-1	1	1	3
4	1	1	3	3
5	0	0	2	2

La tabla 15 nos muestra los niveles de las pruebas del diseño experimental tanto en escala natural como en escala codificada

Tabla 16 Variables y sus niveles operativos para las pruebas experimentales

	Variables	Nivel inferior	Nivel intermedio	Nivel superior
A	Concentración de cianuro (ppm)	1	2	3
B	Tiempo de cianuración (días)	1	2	3

En la tabla 16 podemos ver que tenemos dos variables o factores predictores con 3 niveles los cuales son nivel inferior, medio y superior.

Tabla 17 Condiciones operativas para las pruebas del diseño factorial

N° de prueba		1	2	3	4	5
Concentración de NaCN	(ppm)	1	3	1	3	2
Tiempo de cianuración	días	1	1	3	3	2
Peso del mineral	kg			2		
Ley de mineral	g/TM			17.28		
Granulometría	%-200 malla			80.3		
Gravedad específica	g/cm ³			2.56		
pH				12		
Volumen de agua	L			4		
Vol. muestra a titular	mL			5		

La tabla 17 nos muestra las condiciones operativas de las 5 pruebas experimentales, que se ejecutaron.

CAPITULO VI

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Determinación de la gravedad específica

La tabla 18 nos muestra los resultados de la prueba para determinar la gravedad específica de la muestra.

Tabla 18 Cálculo de la gravedad específica del mineral

Prueba	W_m (g)	W_{f+a} (g)	W_{f+m+a} (g)	GE
1	5	146.94	150.00	2.58
2	5	147.00	150.04	2.55
3	5	146.99	150.02	2.54
Promedio				2.56

Como podemos ver en la tabla 18 la gravedad específica promedio es de 2.56 g/cm^3

6.2. Determinación de tiempo de molienda

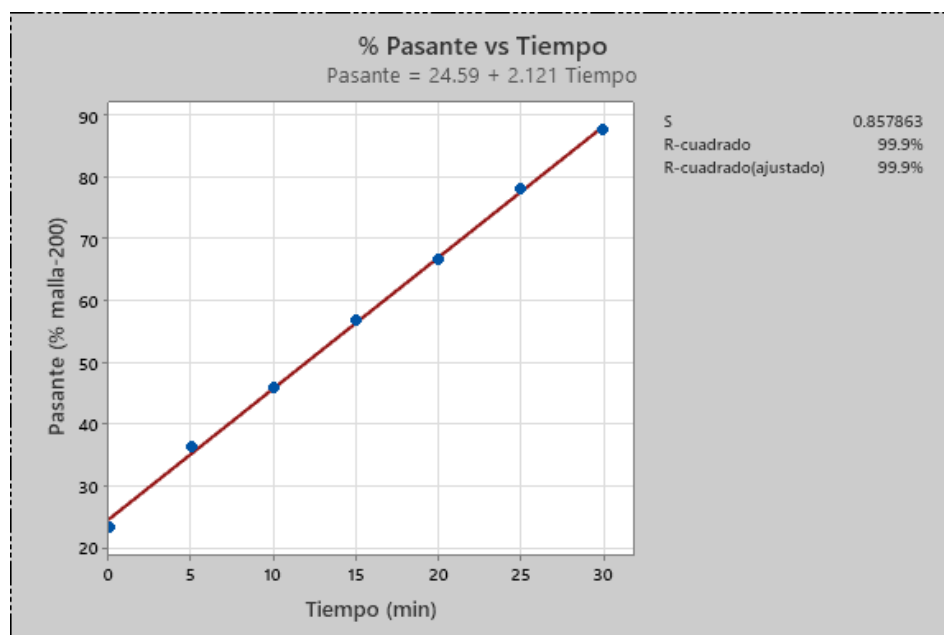
Tabla 19 Datos obtenidos en la prueba de molienda

N° prueba	Tiempo (min)	Retenido (% malla+200)	Pasante (% malla-200)
1	0	76.6	23.4
2	5	63.7	36.3
3	10	54.1	45.9
4	15	43.1	56.9
5	20	33.4	66.6
6	25	21.9	78.1
7	30	12.4	87.6

La tabla 19 nos enseña los resultados de la prueba de molienda a diferentes tiempos

A partir de los datos de la tabla 19 se obtuvo la siguiente grafica.

Figura 11 Gráfica de regresión lineal del tiempo de molienda vs porcentaje pasante

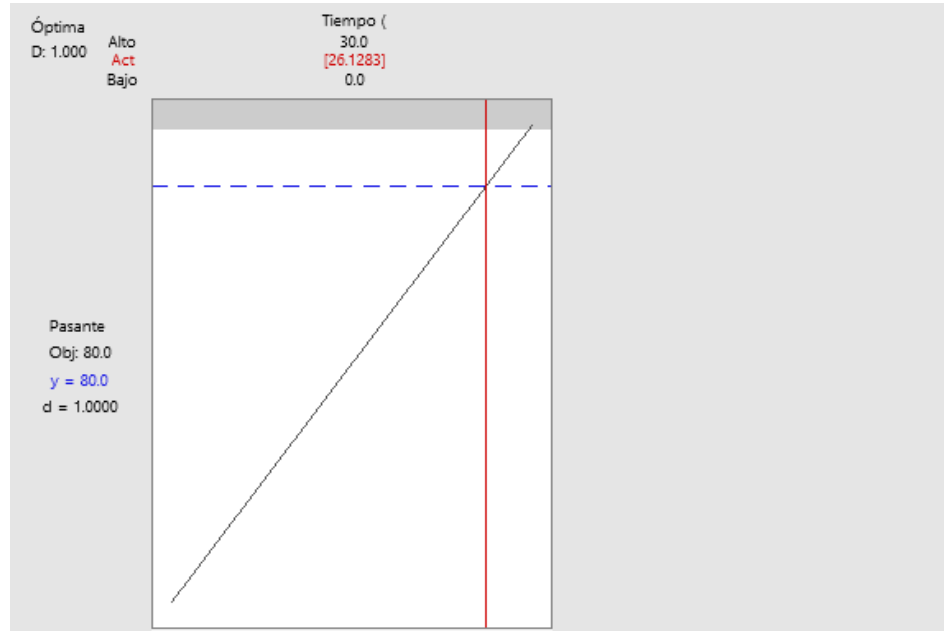


En la figura 12 podemos ver la gráfica de regresión lineal, la cual describe la cinética de molienda para nuestro mineral, por medio de dicha regresión lineal se obtiene la siguiente ecuación.

$$Pasante = 24.59 + 2.121Tiempo \quad (23)$$

A partir de dicha ecuación despejamos el valor de tiempo para luego determinar el tiempo óptimo para llegar a un 80% -200 mallas.

Figura 12 Gráfica de predicción para el tiempo óptimo de molienda



Como se puede observar en la figura 13, el tiempo óptimo de molienda para nuestro mineral es de 26.13 minutos.

6.2.1 Cálculo de W_i del mineral

Empleando la ecuación Bond

$$W = 10W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad (24)$$

Datos de la prueba:

- $F_{80} = 2500 \text{ } \mu\text{m}$
- $P_{80} = 74 \text{ } \mu\text{m}$

- *Energía específica medida:* $W = 13.7 \text{ kWh/t}$

Reemplazando:
$$W_i = \frac{13.7}{10 \left(\frac{1}{\sqrt{74}} - \frac{1}{\sqrt{2500}} \right)} \quad (25)$$

$$W_i = \frac{13.7}{10 * 0.0963}$$

$$W_i = 14.2 \text{ kWh/t}$$

6.3. Prueba de cianuración

Resultados de la prueba preliminar de cianuración

Tabla 20 Consumo de reactivos de cianuración

Consumo de reactivos		
NaCN	3.160	kg/TM
NaOH	1.500	kg/T M

La tabla 20 nos muestra el consumo de cianuro es de 3.16 kg/TM mientras que el consumo de soda caustica es de 1.50 kg/TM, comprando con el consumo promedio

Tabla 21 Extracción de oro respecto al tiempo de cianuración

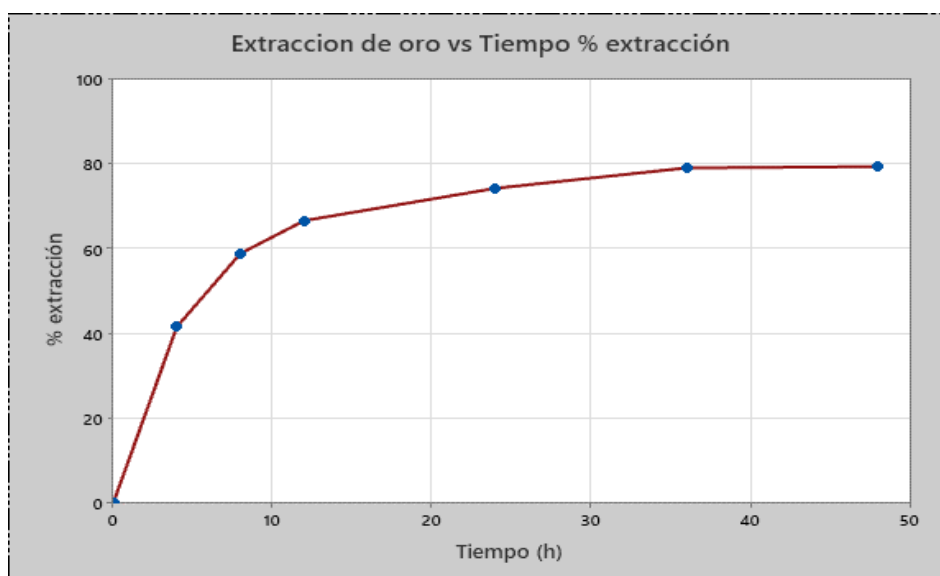
Tiempo (h)	% extracción
0	0
4	41.520
8	58.800
12	66.500
24	74.100
36	78.900
48	79.200

La tabla 21 nos muestra el porcentaje de extracción de oro respecto del tiempo de cianuración, esto en la prueba preliminar, en base a dicha tabla se obtuvo el grafico de cinética de la cianuración, (inferimos que tiene una línea asintótica en 80% con lo corroboramos que no podemos tener una mayor extracción con las condiciones operativas de la prueba preliminar.

Figura 13 Gráfico de la cinética de la cianuración para la prueba preliminar

La figura 14 nos muestra la gráfica de cinética de la cianuración para la prueba preliminar de cianuración en donde podemos observar que se genera una asíntota cercana al valor de 80% de extracción, podemos ver que la extracción bajo condiciones normales no supera el 80%.

Tabla 22 Balance metalúrgico de la prueba preliminar de cianuración



Componentes		Ley Au	Contenido metálico	% extracción
Cabeza	2 kg	17.28 g/TM	34.56	79.2
Solución rica	4 L	6.84 g/m ³	27.37	
Relave	2 kg	3.94 g/TM	7.19	

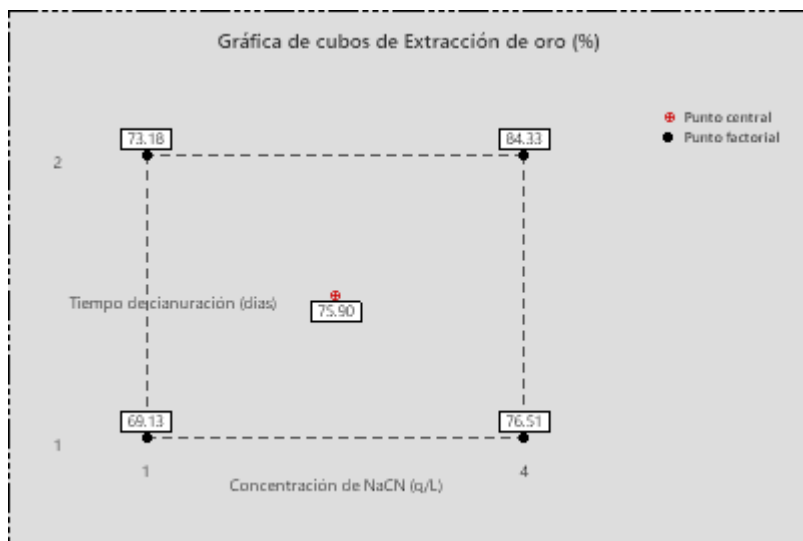
Variables		Concepto	Unidad	Ensaye	Ley cabeza (g/TM)	Ley ripios (g/TM)	Dist. (%)
A	+	Concentración de NaCN	g/L	3	17.28	2.71	84.33
B	+	Tiempo de cianuración	días	3			
Prueba N° 5							
Variables		Concepto	Unidad	Ensaye	Ley cabeza (g/TM)	Ley ripios (g/TM)	Dist (%)
A	0	Concentración de NaCN	g/L	2	17.28	4.16	75.90
B	0	Tiempo de cianuración	días	2			

Para tener un mejor entendimiento de la tabla 23 y para facilitar el analisis estadístico de nuestros resultados los trasladaremos a nuestra matriz del diseño factorial 2²

Tabla 24 Matriz de diseño factorial 2² a escala natural y codificada

N° de pruebas	Escala codificada		Escala natural		% extracción
	X1	X2	A	B	
1	-1	-1	1	1	69.13
2	1	-1	3	1	76.51
3	-1	1	1	3	73.18
4	1	1	3	3	84.33
5	0	0	2	2	75.90

Figura 14 Gráfica de cubos de extracción de oro



La figura 15 nos muestra la gráfica de cuadrados, los cuatro vértices del cuadrado indican las 4 pruebas y el punto rojo es el punto central los vértices están acompañados de los valores que obtuvo cada prueba.

6.4.1. Análisis estadístico de los resultados de las pruebas experimentales

Los datos obtenidos a través de las pruebas experimentales pasaron a ser ordenados y analizados estadísticamente por medio del software minitab 21, este análisis estadístico nos ayuda a validar los datos y determinar la significancia de cada variable predictora, el modelo estadístico para nuestro fenómeno y finalmente nos ayudó a obtener los valores óptimos para la extracción de oro.

Tabla 25 Efecto estimado para extracción de oro

Término	Efecto	Coef.	EE del coef.	Valor T	Valor p
Constante		75.81	0.045	1684.67	0

Concentración de NaCN (A)	9.265	4.6325	0.0503	92.08	0.007
Tiempo de cianuración (B)	5.935	2.9675	0.0503	58.98	0.011
A*B	1.885	0.9425	0.0503	18.73	0.034

La tabla 25 nos muestra la tabla de efectos para nuestras variables, a partir de la cual podemos interpretar que ambas variables tienen una alta significancia dentro del fenómeno, así mismo la interacción de ambas variables posee una alta significancia, esto lo podemos corroborar en la figura 16 donde, todas las barras tanto de las variables A y B como la interacción AB pasan la línea de efecto estandarizado o línea de Durbin Watson.

Figura 15 Diagrama de Pareto

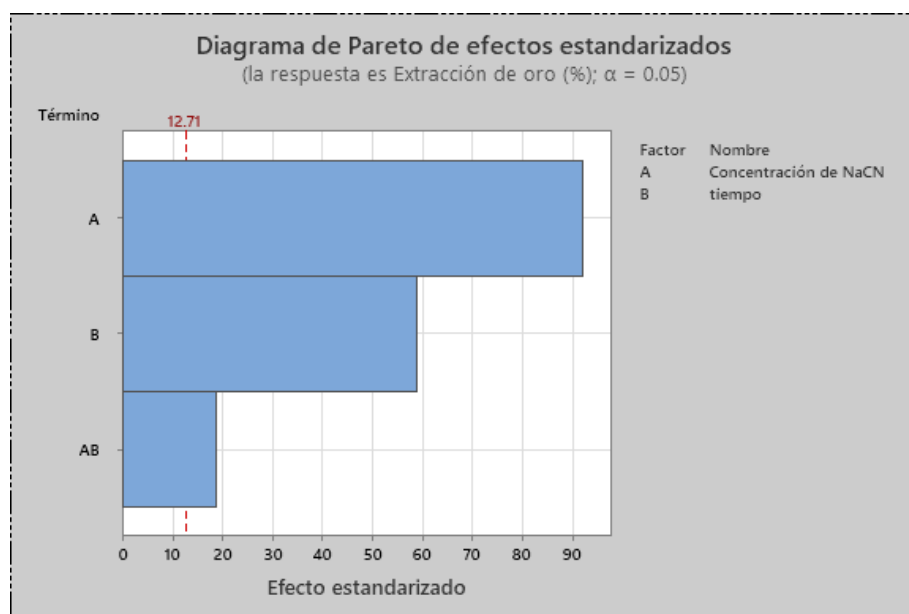
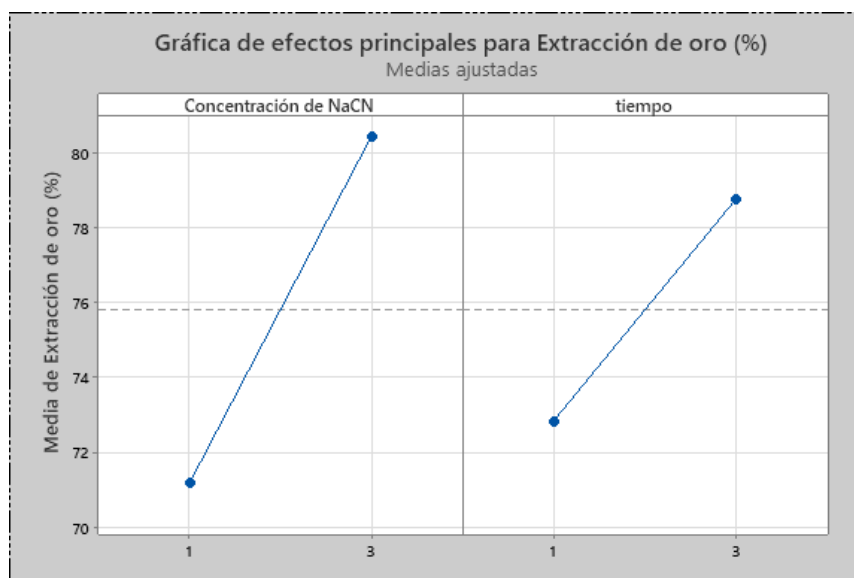
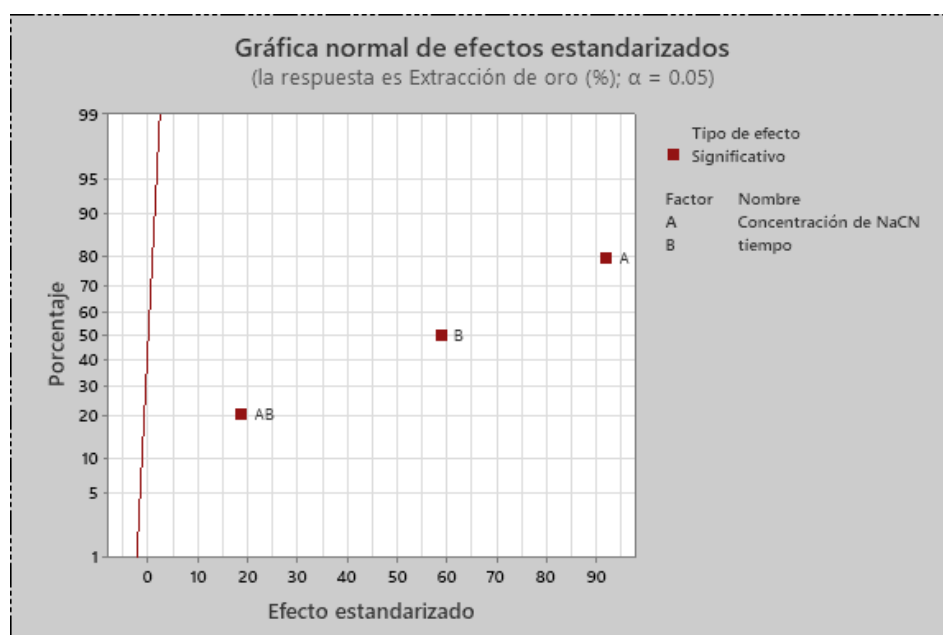


Figura 16 Gráfica de efectos principales para la extracción de oro



La figura 17 nos muestra que ambos factores en dicho gráfico tiene una pendiente positiva con lo cual inferimos que las variables predictoras son directamente proporcionales a la variable de respuesta, el ángulo de la pendiente nos indica el grado de correlación.

Figura 17 Gráfica de efectos estandarizado



La figura 18 nos muestra de manera gráfica que todas las variables incluida la interacción de ambas variables tiene una alta significancia, esto se puede corroborar de forma tabular en la tabla 25.

6.4.1.1. Análisis de varianza

Tabla 26 Análisis de varianza (ANOVA)

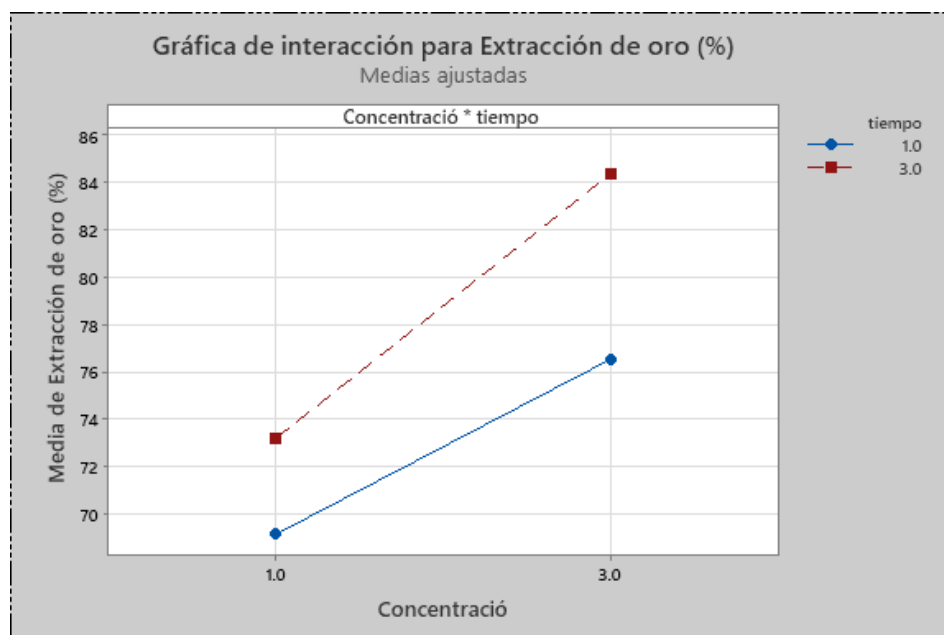
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	124.618	41.5392	4102.64	0.011
Lineal	2	121.064	60.5322	5978.49	0.009
Concentración de NaCN (A)	1	85.84	85.8402	8478.05	0.007
Tiempo de cianuración (B)	1	35.224	35.2242	3478.94	0.011
Interacciones de 2 términos	1	3.553	3.5532	350.94	0.034
A*B	1	3.553	3.5532	350.94	0.034
Error	1	0.01	0.0101		
Curvatura	1	0.01	0.0101		
Total	4	124.628			

La tabla 26 nos muestra el análisis de varianza y del cual podemos inferir ambas variables poseen una gran preponderancia dentro del fenómeno de estudio, así mismo la interacción doble de las variables predictoras.

Tabla 27 Residuos de los valores obtenidos en el modelo

Nº	Y observado	Y estimado	Residuo
1	69.13	69.153	-0.0225
2	76.51	76.533	-0.0225
3	73.18	73.203	-0.0225
4	84.33	84.353	-0.0225
5	75.90	75.810	0.0900

Figura 18 Gráfica de interacción de variables



6.4.1.2. Modelo estadístico

Según el análisis estadístico respecto a nuestras variables predictoras y de respuesta pudimos llegar al siguiente modelo estadístico el cual describe nuestro fenómeno

Ecuación de regresión en unidades codificadas

$$Y = 64.380 + 2.748 A + 1.083 B + 0.9425 A * B$$

Donde:

Y = Porcentaje de extracción de oro

A = Concentración de NaCN

B = Tiempo de cianuración

Tabla 28 Resumen del modelo estadístico

S	R-cuadrado	R-cuadrado (ajustado)	R-cuadrado (predicción)
0.100623	99.99%	99.97%	99.34%

A partir de la tabla 28 inferimos que según el valor R-cuadrado nuestro modelo estadístico es bastante preciso respecto al fenómeno de estudio.

6.4.1.3. Optimización de respuestas

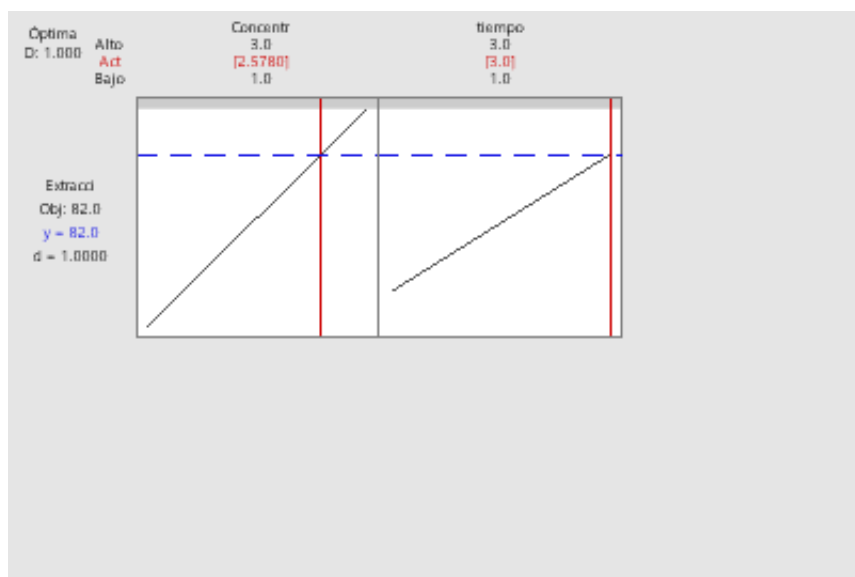
Como el diseño experimental usado es de tipo factorial este no nos permite realizar extrapolaciones para nuestro objetivo y este mientras esté más cerca al valor máximo obtenido tiene una deseabilidad compuesta baja por lo cual se optó por tener una predicción aproximada del 82% de extracción de oro, haciendo uso de la herramienta de buscar un objetivo en minitab 21 se solicitó al software un total de 4 soluciones para poder ver cuáles son las que poseen una deseabilidad compuesta alta.

Tabla 29 Valores óptimos para un 82 % de extracción

Solución	Concentración de NaCN (g/L)	Tiempo (días)	% extracción predicha	Deseabilidad compuesta
1	2.578	3.000	82.000	1.000
2	3.000	2.398	82.000	1.000
3	2.969	2.438	82.000	1.000
4	1.000	2.468	72.126	0.233

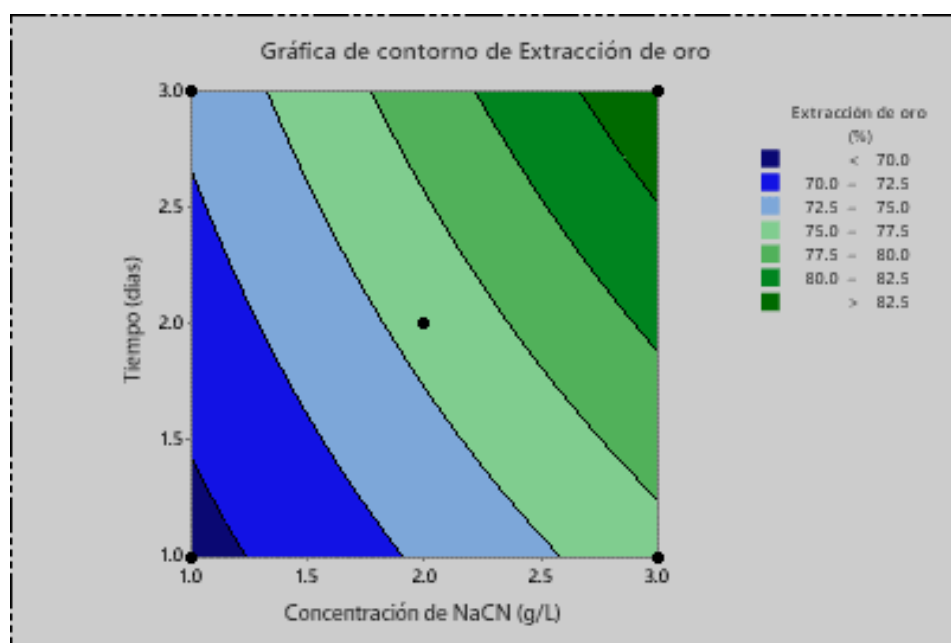
La Tabla 30 nos dan las posibles soluciones para obtener una extracción del 82% y para ello tomamos en cuenta que el circuito de tanques tiene un tiempo de residencia de 72 horas, para lo cual se tiene que la concentración de cianuro de sodio es de 2.578 g/L

Figura 19 Gráfica de predicción



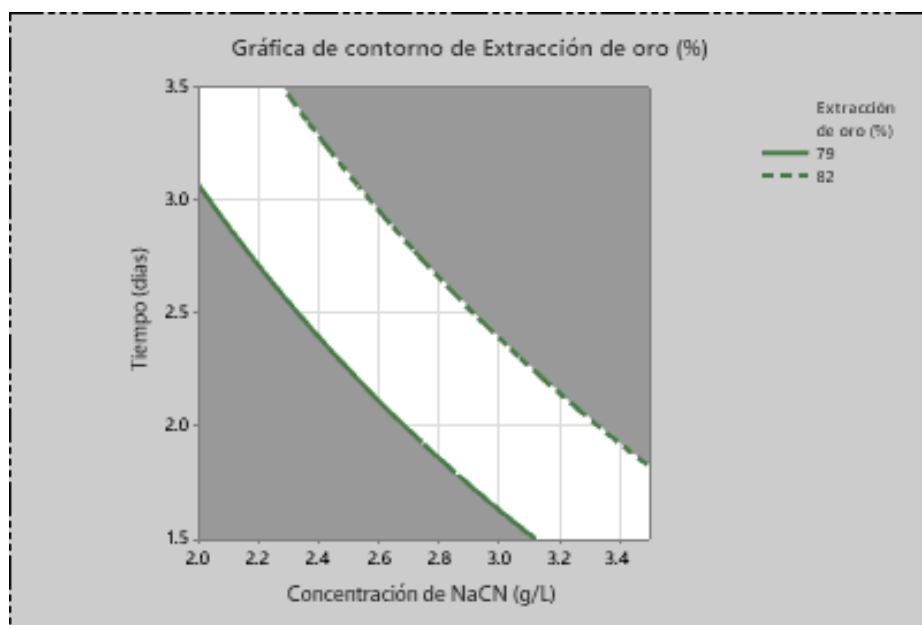
La figura 20 nos muestra la gráfica de predicción en donde vemos que el valor óptimo para tener una alta extracción de oro los valores que deben de tomar las variables predictoras son 2.578 g/L de cianuro de sodio y un tiempo de cianuración de 3 días.

Figura 20 Gráfica de contorno de extracción de oro



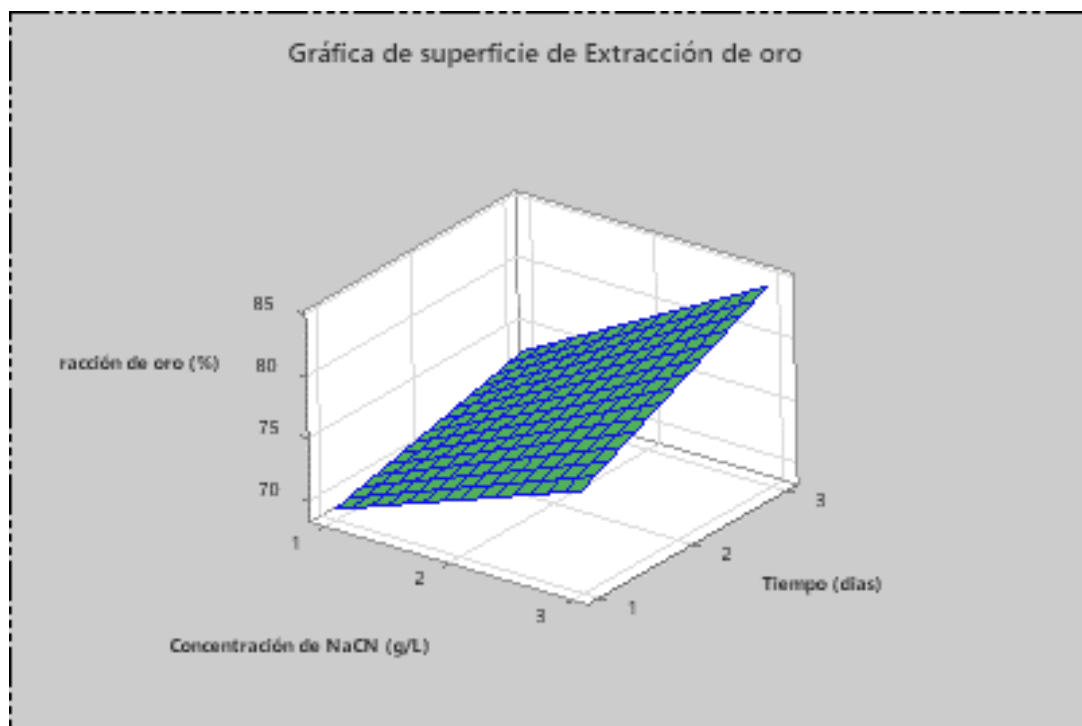
La figura 21 nos permite ver por medio de intervalos los cuales están representados por áreas de colores intervalos para los valores de las variables predictoras respecto a un intervalo de las variables de predicción, siendo los dos colores verdes más oscuros el intervalo de la máxima extracción, dichos intervalos para el tiempo de cianuración es [1.9-3.0] días, para la concentración de NaCN es [2.578-3.0] g/L para llegar a un rango de extracción de oro de [80-82.5]%, la cual es corroborada en la figura 22 en donde consideramos como rango de extracción del [79-82] %.

Figura 21 Gráfica de contorno restringido



La figura 22 nos permite ver los intervalos óptimos para las variables predictoras, para lo cual tomamos un rango del [79-82] % de extracción de oro con lo cual corroboramos que las predicciones según nuestro modelo son confiables y precisas.

Figura 22 Gráfica de superficie para la extracción de oro



La figura 23 nos permite apreciar la interacción de todas nuestras variables, la importancia de este gráfico es que nos permite ver en una gráfica de tres dimensiones dicha interacción y esta se representa por medio de una superficie en nuestro caso vemos que no existen anomalías en nuestra superficie.

CONCLUSIONES

Concluido el trabajo de investigación aquí presente, llegamos a las siguientes conclusiones

- Al realizar la optimización de las variables de lixiviación de minerales piríticos auríferos, por el proceso de cianuración por agitación, se llegó a obtener una extracción del 84.33 %.
- Se determinó que la concentración de cianuro de sodio necesaria para obtener una extracción de oro del 84.33 %, se debe de mantener el siguiente rango de fuerza de cianuro es de 2.578 g/L.
- Se determinó que el tiempo de cianuración óptimo para lograr una máxima extracción de oro es de 3 días, siendo este el límite máximo de tiempo de residencia de la pulpa en los tanques de cianuración de la planta.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar pruebas a nivel de pilotaje para validar los resultados obtenidos en esta investigación y asegurar la implementación a nivel de planta.
- Se recomienda realizar una evaluación de otras variables como el pH, granulometría, % de sólidos, concentración de oxígeno disuelto, etc.
- Se recomienda realizar una serie de pruebas mineragráficas y mineralúrgicas con el objetivo de ver el tipo de refractariedad que presenta el mineral del yacimiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- Adams, M. (2016). *Gold Ore Processing: Project Development and Operations*. Elsevier.
- Alfaro, M. (2002). *Introducción al Muestreo Minero*. Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, Santiago, Chile.
- Aliaga, H., & Palomino, D. (2015). *Extracción del oro a partir de carbón activado cargado empleando soluciones hidro alcohólicas en la planta de cianuración de laytaruma. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]*. repositorio. Obtenido de [http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/2636/Garcia Ventocilla-Mamani Gamarra.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/2636/Garcia_Ventocilla-Mamani_Gamarra.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Aranburú, V. (2015). *Proceso innovador para mejorar la extracción de oro y reducir la contaminación ambiental en la minería artesanal.[tesis, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]*. Repositorio. Obtenido de <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/cybertesis/4605>
- Arenas, M. (1995). *Reconocimiento Geológico Preliminar de la Mina Aurífera Santa Filomena*. Nasca: Mina Aurífera Santa Filomena.
- Azañero, A., Núñez , P., Figueroa , A., Leon, E., Caballero, M., Vega, V., . . . Morales, M. (2000). *Cianuración intensiva de un concentrado aurífero* (Vol. 3). Lima: Editorial de la UNMSM. doi:<https://doi.org/10.15381/iigeo.v3i06.2543>
- Ballester, A., Ballester, B., Verdeja, L., Sancho, J., & Martínez , J. (2000). *Metalurgia Extractiva* (Vol. 1). Síntesis Editorial. doi:978-84-7738-802-9

- Barrera, J. E. (2017). *Evaluación de variables del proceso de cianuración de minerales refractarios pirítico en la Unidad Minera Calpa-Arequipa [tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]*. Bibliotecas especializadas-UNSAAC.
- Botero, Y. (2021). *Estudio de mecanismos de cianuración de oro considerando interacciones fisicoquímicas de interfase. [tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]*. repositorio. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80515>
- Boyle, R. (1987). *Gold History and Genesis of Deposits*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Bustanza, V. (2019). *Estudio del uso de nitrato de plomo para optimizar la extracción del oro en el proceso de cianuración. [tesis, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]*. Repositorio. Obtenido de <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/f145fb12-97be-46ba-b349-200a8a583fac>
- Caicedo, y. o. (2009). Discrepancias en los cálculos termodinámicos relacionados con la deshidrogenación de parafinas. *Informacion Tecnologica*.
doi:<https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.4109ait.08>
- Canal, N. (2009). Técnicas de muestreo. Sesgos más frecuentes. *Revista Seden*, 121-132.
Obtenido de <https://revistaseden.org/files/9-CAP 9.pdf>
- Castilla, J., & Herrera, J. (2012). *El Proceso de exploración minera mediante sondeos*. Universidad Politécnica de Madrid. Obtenido de
https://oa.upm.es/10695/1/Proceso_Exploracion_Minera_mediante_Sondeos_20120330_2.pdf

Contreras, D. (1967). Experimentación de minerales de oro y plata por el proceso de cianuración.

Número 8 de Boletín // Comisión de Fomento Minero. Vidriales Offset. Obtenido de

<https://books.google.com.pe/books?id=JOOGPgAACAAJ>

Cornelio, A. (2017). *Diagnóstico del circuito de molienda y cianuración, para fijar los*

parametros de control de las operaciones de la Minera Vicus S.A.C. [tesis, Universidad

Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. Repositorio. Obtenido de

<https://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/2141>

Dominic, E. M. (2001). *Hidrometalurgia fundamentos, procesos y aplicaciones.* Santiago, Chile:

Ministerio de Minería.

Ferrer, H. (2019). *Caracterización y tratamiento por cianuración de sulfuros para la extracción*

de oro en Quílo – Ambo – Huánuco - 2019. [tesis de pregrado, Universidad Nacional

Daniel Alcides Carrión]. Repositorio. Obtenido de

http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/1559/1/T026_70747926_T.pdf

Frias, M., Fátima, D., Suárez, J., Díaz, I., Alonso, J., & Liriano, E. (2015). Estudio de la

cinética de lixiviación de oro y plata de una mena cuarzosa de origen epitermal.

Congreso Cubano de Geología, 1-9. Obtenido de

<http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2015-Figueredo-plata y oro.pdf>

Gy, P. (1979). *Sampling of particulates materials. Theory and Practice.* Ámsterdam: Elsevier

Scientific Publishing Company.

Gy, P. (1982). *Sampling of Particulate Materials.* Ámsterdam: Elsevier Scientific Publishing

Company.

Higuera, O., Flores, L., & Peña, D. (2009). *Estudio del proceso de pulimento químico de piezas*

de joyería. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v76n158/a08v76n158.pdf>

- Huaranga, F., Truxillense, H., Méndez, E., & Bernuá, F. (2021). Bioindicator species of contamination by mining tailings in the Samne Sector, La Libertad-Peru, 2021. *Arnaldoa*, 633-650. Obtenido de <http://www.scielo.org.pe/pdf/amp/v29n1/a12v29n1.pdf>
- INGEMET. (2015). *Resumen derecho minero*. Lima: Archivo central.
- Jara, O. (2005). *Reporte geológico mina Aidita*. Lima: CIA Minera Abeg SAC.
- La Brooy, S., Linge, H., & Walker, G. (1994). *Review of Gold Extraction from Ores*. Minerals Engineering. doi:1213–1241
- Mamani, E. D. (2015). *Estudio de investigación para el procesamiento de minerales auríferos de la franja minera aurífera Nazca [tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín]*. Repositorio UNSA. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/2698>
- Marsden, J., & House, C. (2006). The Chemistry of Gold Extraction. *Metallurgy and Exploration*. Society for mining.
- Mendoza, O., & Pedraza, J. (2005). Efecto del catalizador LeachWell 60X® y de los iones Pb+2 y S-2 en el proceso electroquímico de la cianuración del oro en minerales sulfurados. *Revista Facultad de Ingeniería*, 9-20. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n37/n37a01.pdf>
- Misari, F. (2010). *Metalurgia del oro*. Lima: Editorial San Marcos.
- Morales, D. A. (2011). *Procesamiento de un mineral aurífero refractario polisaturado para la extracción de oro [tesis de licenciatura, Escuela Politécnica Nacional (Ecuador)]*. Repositorio digital EPN. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2742>

- Nagy, J., Mrskerse, P., & MC Colluch, A. (1993). *Tratamiento químico de menas refractarias de oro [tesis de licenciatura, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy]*. Repositorio SAIMM.
- Parga, J., & Carrillo, F. (1995). Avances en los métodos de extracción. *Revista de metalurgia CENIM*, 8.
- Pérez, y. o. (2019). Ensayo geometalúrgico para la extracción de oro de la zona de sulfuros primarios de la mina La Herradura, Sonora, México. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*. doi:<https://doi.org/10.18268/BSGM2019v71n1a8>
- Plengue, F. (2012). Minería informal e ilegal y contaminación con mercurio en Madre de Dios : Un problema de salud pública. *Acta Méd. Peruana*. Obtenido de <http://www.scielo.org.pe/pdf/amp/v29n1/a12v29n1.pdf>
- Porras, D. (2010). *Procesamiento de minerales*. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Quispe, P., & Paliza, T. (2024). *Optimización de la extracción de oro por el proceso de cianuración en la planta de beneficio de la compañía minera Jerusalén SAC-Chala-Arequipa* *Bibliotecas especializadas-UNSAAC*. Bibliotecas especializadas-UNSAAC. Obtenido de https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/8653/253T20240233_TC.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ruiz, J., López , C., Carmona, M., & Bolívar , W. (2019). Modelamiento estadístico y optimización del proceso de cianuración de un mineral aurífero. *Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*, 33-51. doi:<https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n53.2019.9745>.

- Ruiz, M. (2013). *Hidrometalurgia*. Departamento de Ingenieria Metalúrgica [Universidad de Concepción].
- Salazar, M., Elorza, E., & Alvarado, M. (2016). *Análisis de Cianuro Libre con el Ion Sulfuro como Interferencia*. In Avances en la Metalurgia Extractiva, Materiales y Medio Ambiente.
- Salinas, E., Rivera, I., Carrillo, F., Patiño, F., Hernandez, J., & Hernández , L. (2004). *Mejora del proceso de cianuración de oro y plata, mediante la preoxidación de minerales sulfurosos con ozono*. Rev. Soc. Quím. Méx.
- Sanchez, A., Del Barrio, M., & Martínez , O. (2019). El beneficio del oro en minerales refractarios de la Faja Pirítica. *Boletín Geológico y Minero*, 20.
doi:10.21701/bolgeomin.130.2.007
- SGS, S. G. (2017). *Oro refractario*. Obtenido de <https://www.sgs.com/es-pe/services/oro-refractario>
- Soto , A. (2021). *Evaluación De La Cianuración De Concentrados De Oro Y Plata*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. repositorio. Obtenido de <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/08832c2e-51b4-457e-ae9b-a4ce927ce936/content>
- Soto, A. (2021). *Evaluación De La Cianuración De Concentrados De Oro Y Plata*. [tesis de pregrado, Universidad Nacional de an Agustín de Arequipa]. Repositorio. Obtenido de <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/08832c2e-51b4-457e-ae9b-a4ce927ce936/content>
- Uceda, D. (2016). *Hidrometalurgia química e ingeniería*. Lima: Instituto de Ingenieros de Minas del Perú.

Vargas. (2019). Estudio Ambiental Y Optimización En La Extracción Del Oro Utilizando El Cianuro. *Ciencia & Desarrollo*, 10, 75-80.

doi:<https://doi.org/10.33326/26176033.2006.10.204>

Vargas, J. (1981). *Metalurgia del oro y la plata*. La Paz: Banco Minero de Bolivia.

Vilcapoma, J. (2021). *Optimización de la extracción y modelamiento de las variables operativas que afectan el circuito de lixiviación con cianuro de la planta de procesamiento de oro de Ares utilizando un modelo CCD [tesis de maestria, UNCP]*. Repositorio de la Escuela de Posgrado de la Facultad de Ingenieria de Minas. Obtenido de https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/6769/T010_43705712_M.pdf?sequence=1

Villacres, L. (1993). *Lixiviación de oro por agitación*. Obtenido de www.textoscientificos.com/mineria/lixiviacion/cianura.pdf

Yáñez , J., García , I., Pedraza, J., & Laverde, D. (2005). Caracterización de los minerales auríferos de la zona minera de san pedro frío (Bolívar- Colombia), para la selección de los procesos de extracción. *Dyna*. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v72n145/a03v72n145.pdf>

ANEXOS

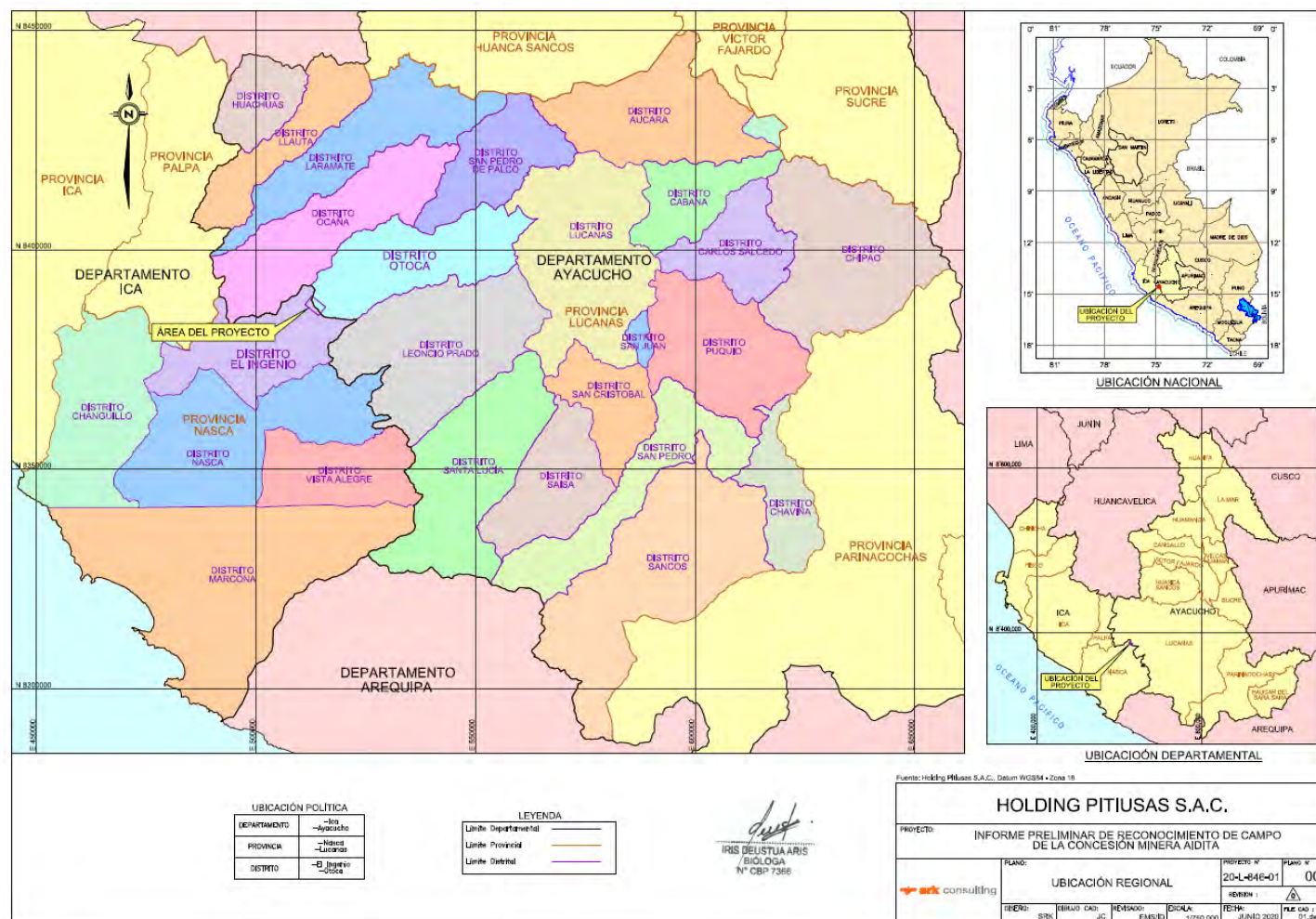
Matriz de consistencia

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables
General	General	General	Dependiente
¿Se podrá optimizar la extracción de oro a partir de los minerales piritosos por medio del proceso de cianuración por agitación en la planta de beneficio de la Unidad Minera Aidita?	Optimizar la extracción de oro a partir de los minerales piritosos por medio del proceso de cianuración por agitación en la planta de beneficio de la Unidad Minera Aidita	Se puede lograr una extracción óptima de oro y maximizar los resultados metalúrgicos en base a la evaluación de la concentración de cianuro y el tiempo de cianuración	Extracción de oro (%)
Específicos	Específicos	Específicos	Independiente
-¿Cuál es la concentración de cianuro de sodio que permita incrementar la extracción de oro a partir de los minerales piritosos por medio del proceso de cianuración por agitación en la planta de beneficio de la Unidad Minera Aidita?	-Determinar la concentración de cianuro de sodio que permita incrementar la extracción de oro a partir de los minerales piritosos por medio del proceso de cianuración por agitación en la planta de beneficio de la Unidad Minera Aidita.	La concentración óptima de cianuro de sodio permite una adecuada extracción de oro a partir de menas auríferas por medio del proceso de cianuración por agitación en la planta de beneficio de la Unidad Minera Aidita.	Concentración de cianuro (g/L)
-¿Cuál es el tiempo de cianuración que permita incrementar la extracción de oro a partir de los minerales piritosos por medio del proceso de cianuración por agitación en la planta de beneficio de la Unidad Minera Aidita?	-Determinar el tiempo de cianuración que permita incrementar la extracción de oro a partir de los minerales piritosos por medio del proceso de cianuración por agitación en la planta de beneficio de la Unidad Minera Aidita.	El tiempo de cianuración óptima permite maximizar la extracción de oro a partir de menas auríferas por medio del proceso de cianuración por agitación en la planta de beneficio de la Unidad Minera Aidita.	Tiempo de cianuración (horas)

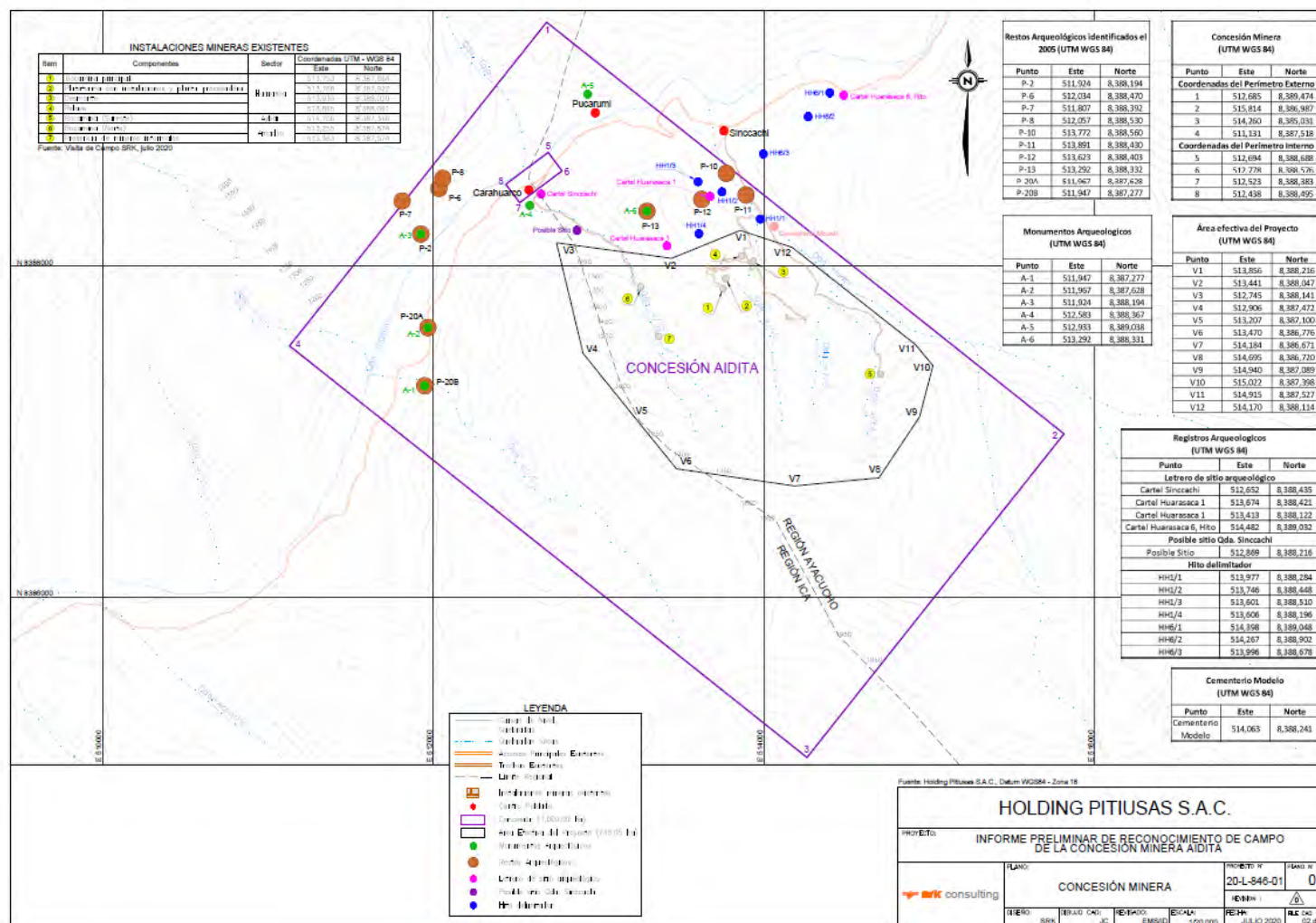
la planta de beneficio de la
Unidad Minera Aidita?

la planta de beneficio de la
Unidad Minera Aidita.

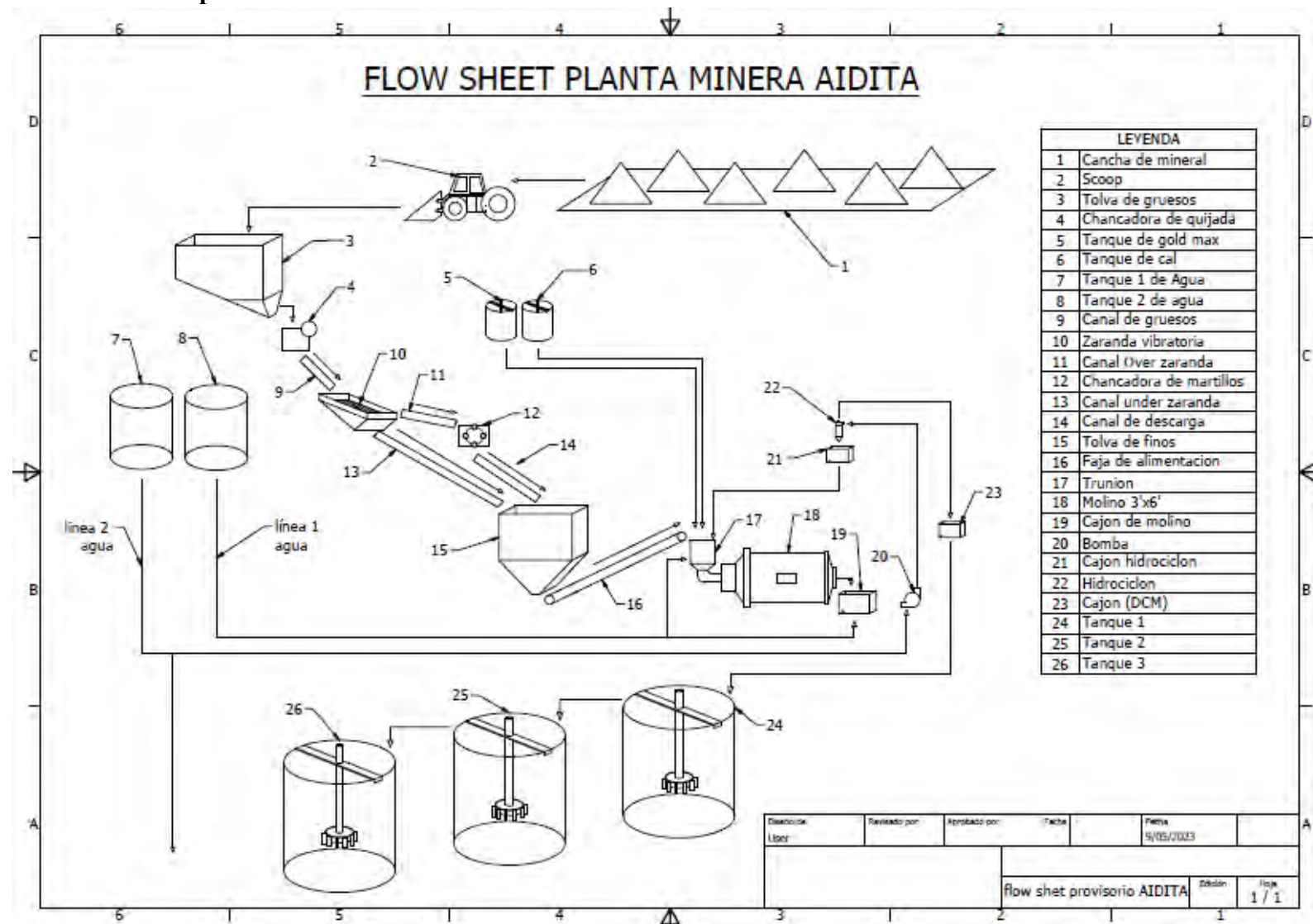
Ubicación regional de la unidad minera Aidita



Mapa de la concesión minera



Flow sheet de la planta de beneficio de la Unidad Minera Aidita



Molino de billas 3x6



Tanques 12x12 del circuito de cianuración



Pruebas de cianuración por agitación a nivel de laboratorio



Certificados de laboratorio



MINARES SOUTH S.R.L.

LABORATORIO QUÍMICO
ANÁLISIS QUÍMICO DE MINERALES Y
PRUEBAS METALÚRGICAS DE FLOTACIÓN - CIANURACIÓN

CERTIFICADO DE ANÁLISIS

CLIENTE : HOLDING PITIUSAS S.A.C

SOLICITUD DE ANÁLISIS : RECONOCIMIENTO: Au

RECEPCIÓN DE MUESTRAS

DESCRIPCIÓN : SOLIDO

CODIGO : LC0705

N° DE CODIGO DE LABORATORIO : 245

MUESTRA ENVASADA EN : BOLSA PLASTICA SELLADA

PESO DE LA MUESTRA : 2.3 kg

FECHA DE RECEPCIÓN : 7/05/2023

FECHA DE ENTREGA DE RESULTADO : 7/05/2023

ITEM	CODIGO DEL CLIENTE	RESULTADOS Au	
		LEY FINAL Au (Oz/tc)	(g/TM)
01	LC0705	0.505	17.28

GRANULOMETRIA : 80 % - 200m

MÉTODO : FIRE-ASSAY

NOTA	Los resultados indicados en el presente documento, corresponde al analisis solicitado en la muestra recibida del cliente.
-------------	---





ING. DANIEL HUATUCO SOTO
JEFE DE LABORATORIO Y CONTROL DE CALIDAD
REG. CIP N° 72140

Av. Panamericana Sur Nº 355 - Vista Alegre - Nasca Cel.: 986635088 / minaressouthnazca@gmail.com / informesnasca@minares.com.pe
 Av. 19 de Diciembre Mz. 36 Lte. 11 - La Aguadita - Chala - Cel.: 986635086 / minaressouth2014@outlook.com / informeschala@minares.com.pe
 Parque San Martín Nº 224/226 - Dpto. 1401- Pueblo Libre - Lima Telf.: 01 530 4689 Cel.: 986635085 / informeslima@minares.com.pe
www.minares.com.pe



MINARES SOUTH S.A.L.

LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS QUÍMICO DE MINERALES Y
PRUEBAS METALÚRGICAS DE FLOTACIÓN - CIANURACIÓN

CERTIFICADO DE ANÁLISIS

CLIENTE : HOLDING PITIUSAS S.A.C
SOLICITUD DE ANÁLISIS : PRUEBA DE CIANURACION

RECEPCIÓN DE MUESTRAS

DESCRIPCIÓN : MINERAL
N° DE CODIGO DE LABORATORIO : 00256
MUESTRA ENVASADA EN : BOLSA PLASTICA SELLADA
FECHA DE RECEPCIÓN : 11/05/2023
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADO : 13/05/2023

CONDICIONES DE LA PRUEBA		
PESO DE MINERAL SECO	2	kg
LEY DE MINERAL	17.28	g/TM
GRANULOMETRIA	80.3	%-200 mallas
GRAVEDAD ESPECIFICA	2.56	g/ml
RELACIÓN S/L	2	
VOL. SOLUCIÓN	4	l
PH	12	
CONCENTRACION DE NaCN	2000	ppm
TIEMPO	48	horas



MINARES SOUTH S.R.L.

LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS QUÍMICO DE MINERALES Y
PRUEBAS METALÚRGICAS DE FLOTACIÓN - CIANURACIÓN

CONTROL DEL PROCESO DE CIANURACIÓN :

HORA	TIEMPO (h)	CONTROL DE PARAMETROS				ADICIÓN DE REACTIVOS	
		PH		AgNO ₃ (ml)	CN- libre	NaCN (g)	NaOH (g)
		INICIAL	FINAL				
12:00:00	0	7	12	0.00	0.000	8.00	3.00
16:00:00	4	12	12	0.20	0.160	0.80	
00:00:00	8	12	12	2.40	0.192	0.40	
08:00:00	8	12	12	2.20	0.176		
12:00:00	4	12	12	1.90	0.152	0.96	
16:00:00	4	12	12	2.50	0.200		
00:00:00	8	12	12	2.90	0.232		
12:00:00	12	12	12	2.40	0.192		
TOTAL	48					10.16	3.00

CONSUMO DE REACTIVOS :

CONSUMO DE REACTIVOS		
NaCN	3.160	kg/TM
NaOH	1.500	kg/T M

BALANCE METALÚRGICO :

COMPONENTES		LEY AU	CONTENIDO METÁLICO	% EXTRACCIÓN
CABEZA	2000 g	17.28 g/TM	34.56	79.2
SOLUCIÓN RICA	4000 ml	6.84 g/m ³	27.37	
RELAVE	2000 g	3.94 g/TM	7.18	



MINARES SOUTH S.R.L.

LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS QUÍMICO DE MINERALES Y
PRUEBAS METALÚRGICAS DE FLOTACIÓN - CIANURACIÓN

TIEMPO (h)	EXTRACCIÓN Au (%)
0	0.000
4	41.520
8	58.800
12	66.500
24	74.100
36	78.900
48	79.200



NOTA: Los resultados indicados en el presente documento, corresponde al analisis solicitado en la muestra recibida del cliente.

ING. DANIEL HUATUCO SOTO
JEFE DE LABORATORIO Y CONTROL DE CALIDAD
REG. CIP N° 72140



MINARES SOUTH S.R.L.

LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS QUÍMICO DE MINERALES Y
PRUEBAS METALÚRGICAS DE FLOTACIÓN - CIANURACIÓN

CERTIFICADO DE ANÁLISIS

CLIENTE : GABRIEL RODRIGUEZ
SOLICITUD DE ANÁLISIS : RECONOCIMIENTO: Au (solidos-solucion)

RECEPCIÓN DE MUESTRAS

DESCRIPCIÓN : PULPA
CODIGO : 000614
N° DE CODIGO DE LABORATORIO : 295 - 300
MUESTRA ENVASADA EN : BOLSA PLASTICA SELLADA
PESO DE LA MUESTRA : -----
FECHA DE RECEPCIÓN : 16/02/2024
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADO : 16/02/2024

ITEM	CÓDIGO DEL CLIENTE	RESULTADOS	
		Ley Au solidos (g/TM)	Ley Au solución (g/m3)
01	PRUEBA 1	5.33	5.975
02	PRUEBA 2	4.06	6.610
03	PRUEBA 3	4.63	6.325
04	PRUEBA 4	2.71	7.285
05	PRUEBA 5	4.16	6.560

ANALISIS	METODO DE AAS
Au	Analisis de Cobre, Plomo, Zing , Molibdeno ,Hierro, Arsenico, Antimonio, Bismuto, y Plata.

ING. DANIEL HUATUCO SOTO
REG. CPN N° 72140

NOTA: Los resultados indicados en el presente documento, corresponde al analisis solicitado en la muestra recibida del cliente.

